L'eredità di Richard Feynman a cent'anni dalla nascita

Le Scienze

Maggio 2018 € 4,90

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Altri mondi

Due nuovi telescopi spaziali partono a caccia di pianeti in grado di ospitare forme di vita

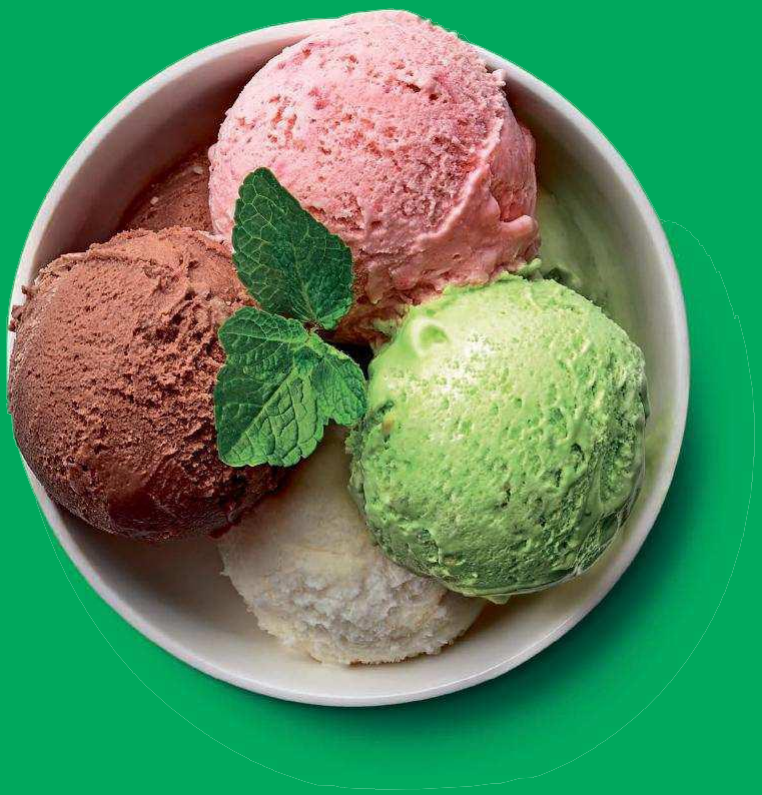
Biologia

Usare cellule adulte per sostituire spermatozoi e ovociti

Chimica

Alla ricerca dei segreti degli elementi superpesanti

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 597 - 4 MAGGIO 2018



“OK Google, quante calorie ci sono in un gelato?”

Richiede una connessione Wi-Fi e uno smartphone/tablet compatibili

€59

Google Home Mini

Il tuo Assistente Google in cucina

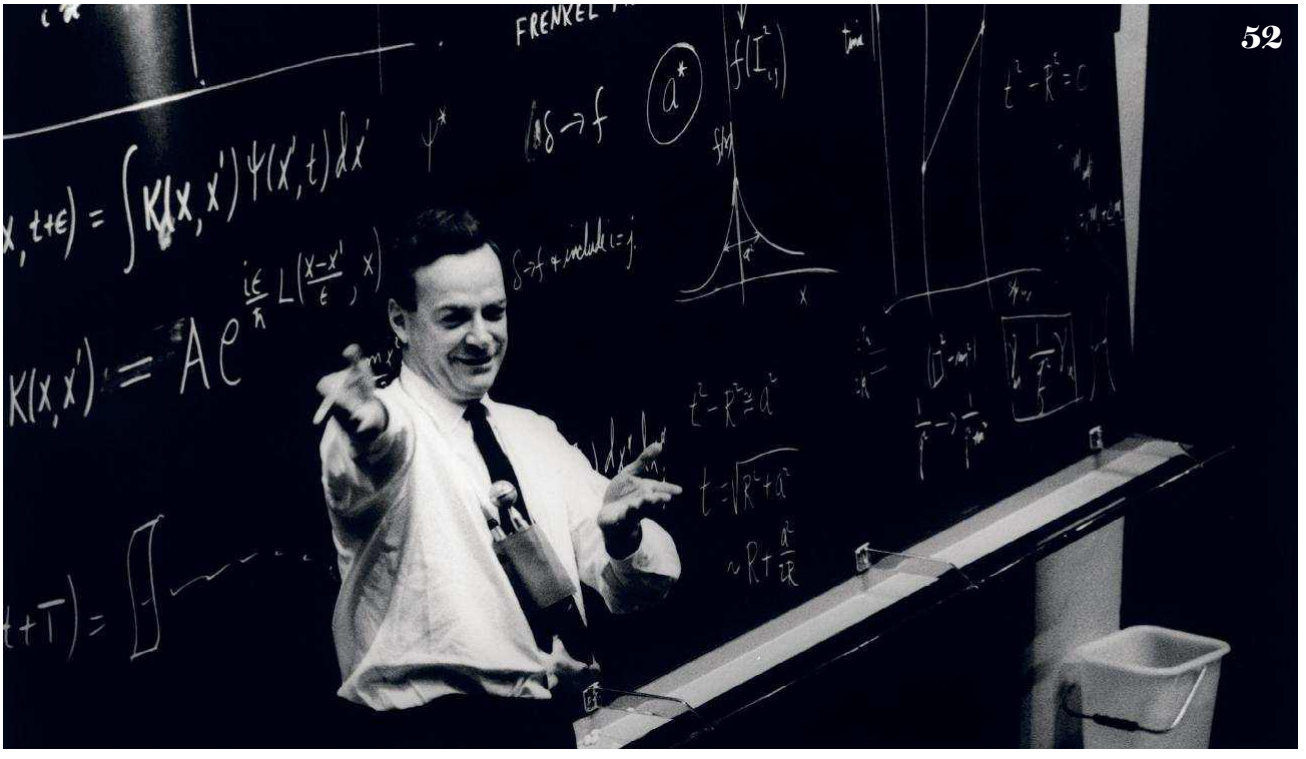
Google Store MediaWorld unieuro WIND 3

IN COPERTINA

NASA e Agenzia spaziale europea andranno alla ricerca di pianeti extrasolari, tra cui anche mondi potenzialmente abitabili, grazie a due nuovi telescopi spaziali: TESS e CHEOPS. (Lynette Cook/SPL/Getty Images)

Sommario

maggio 2018 numero 597



PLANETOLOGIA

30 Ombre di altri mondi

di Joshua N. Winn

Due nuovi telescopi spaziali dovrebbero rivelare una miriade di nuovi esopianeti

CHIMICA

38 L'isola dei pesi massimi

di Christoph E. Düllmann e Michael Block

La creazione degli elementi più pesanti al mondo e l'esplorazione dell'«isola della stabilità» della tavola periodica, dove questi elementi esistono per più di un attimo, sono gli obiettivi di diversi gruppi di ricerca

MEDICINA

46 Gli strumenti della procreazione

di Karen Weintraub

In futuro gli scienziati potranno usare le cellule del sangue o della pelle al posto di spermatozoi e ovuli?

STORIA DELLA SCIENZA

52 Buon compleanno Mr. Feynman!

di Peppe Liberti

Esattamente 100 anni fa nasceva lo scienziato irriverente e brillante che ha dato contributi fondamentali in diversi campi della fisica

MEDICINA

60 Cellule nuove per il fegato

di Roberto Gramignoli

Terapie cellulari innovative potrebbero guarire questo organo eliminando la necessità di ricorrere a procedure complesse e rischiose

NEUROSCIENZE

68 Un'occhiata all'interno

di John Gabrieli

Le tecniche di imaging cerebrale potrebbero trovare le cure migliori per la depressione e le dipendenze, e potrebbero addirittura rimodellare l'istruzione

BIOLOGIA

74 L'evoluzione del ritmo

di Andrea Ravignani, Cinzia Chiandetti e Marco Gamba

La nascita della musica è ancora un mistero per gli scienziati. Tuttavia studi sul campo e in laboratorio suggeriscono che la nostra biologia può spiegare la creazione di sistemi musicali

EVOLUZIONE

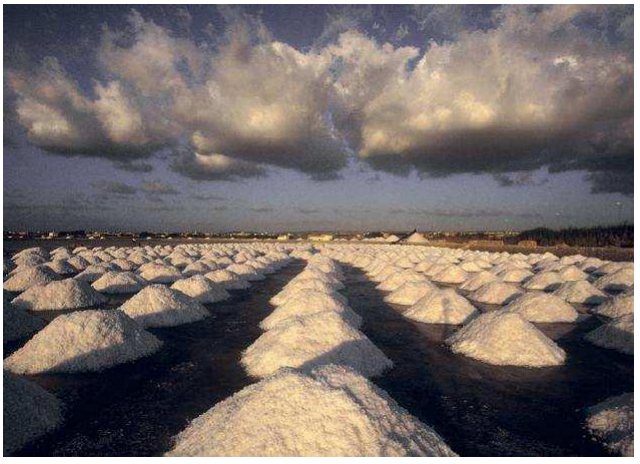
82 Il morso più forte

di Gregory M. Erickson

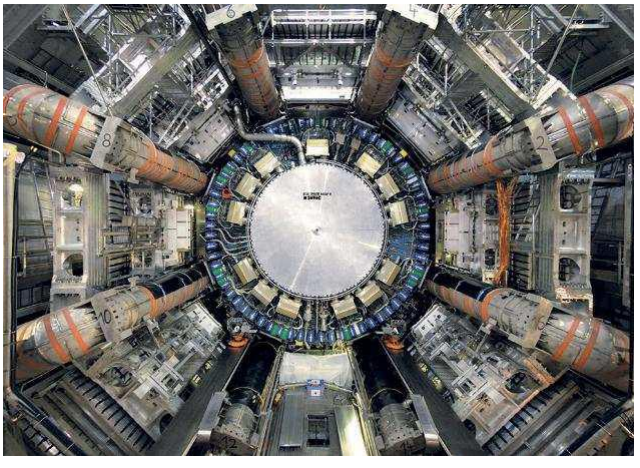
Ricerche ad alto tasso di adrenalina sul morso dei coccodrilli e dei loro parenti rivelano i segreti del successo evolutivo di questo gruppo

Science Photo Library/AGF

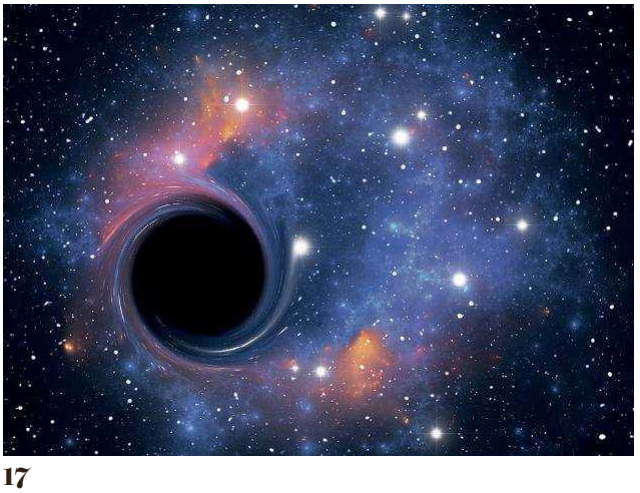
Sommario



12



14



17

Rubriche

7 **Editoriale**
di Marco Cattaneo

8 **Anteprima**

10 **Intervista**
Un futuro quantistico per l'Europa *di Simona Regina*

12 **Made in Italy**
Una miniera marina *di Letizia Gabaglio*

14 **Scienza e filosofia**
Una controversa naturalezza *di Elena Castellani*

15 **Appunti di laboratorio**
Affetto e DNA *di Edoardo Boncinelli*

16 **Il matematico impertinente**
Questo è tutto un programma *di Piergiorgio Odifreddi*

17 **La finestra di Keplero**
L'universo, spiegato da Stephen *di Amedeo Balbi*

18 **Homo sapiens**
Un orecchio per le migrazioni *di Giorgio Manzi*

88 **Coordinate**
Un divario crescente *di Mark Fischetti*

89 **Povera scienza**
Inspiegabile? Sì, grazie! *di Paolo Attivissimo*

90 **La ceretta di Occam**
Preparare la pelle al Sole *di Beatrice Mautino*

91 **Pentole & provette**
Una pillola pericolosa contro la ciccia *di Dario Bressanini*

92 **Rudi matematici**
La gatta di Schrödinger
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 **Libri & tempo libero**

Tommaso Di Girolamo/Agf (*in alto*); cortesia Claudia Marcelloni/CERN (*al centro*); Pasieka/SPL/Getty Images (*in basso*)

SCIENZA NEWS

21 Migliorare l'agricoltura cinese
22 La misteriosa galassia senza materia oscura
22 Testare la gravità quantistica in laboratorio
23 Buchi neri o gravastar?
23 Un fluido quantistico di fotonio
24 L'intelligenza artificiale che aiuta la chimica
24 Una nuova era per gli antibiotici?
26 Geni per cervelli innovatori
26 Un nuovo meccanismo evolutivo
27 Dove e quando piove nelle grandi città
28 Brevissime

GO BEYOND PLASTIC
NORTH SAILS
Discover more at northsails.com

di Marco Cattaneo

La lezione di Feynman

Il confronto impietoso tra la sua carriera e l'Italia di oggi

Sono passati trent'anni dall'uscita in Italia della più divertente autobiografia che sia mai stata scritta da uno scienziato. Zanichelli pubblicò *Sta scherzando Mr. Feynman!* poco dopo la scomparsa del grande fisico statunitense, più famoso per aver spiegato la tragedia dello space shuttle *Challenger* immergendo un O-*ring* in un bicchiere di acqua ghiacciata che per gli straordinari contributi all'elettrodinamica quantistica che gli meritarono il Nobel nel 1965. Anche perché, diciamocelo, la fisica di Feynman è dannatamente ostica.

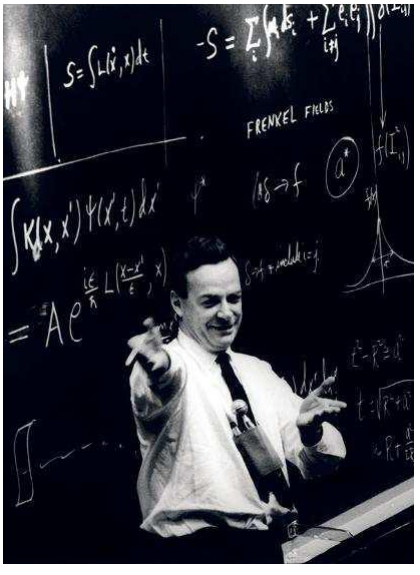
Fatto sta che probabilmente è stata proprio l'immagine del genio irriverente, estroverso, funambolico che esce da quel libro ad alimentare l'icona pop di Richard Feynman. Perché nell'immaginario popolare Feynman è quello che suonava i bongo e sfilava al Carnevale di Rio, o quello che girava per le strade della California su un *van* targato QUARK e coperto di enigmatici disegni che in realtà erano i diagrammi che aveva ideato per rappresentare in modo semplice le particelle e le loro interazioni.

Richard Phillips Feynman nasce a New York l'11 maggio 1918, precisamente un secolo fa. Anzi, «da qualche parte a New York», come diceva lui e come ricorda Peppe Liberti nell'articolo che gli dedichiamo a pagina 52. E dimostra da subito un precoce, raro talento per le scienze, accompagnato da una proverbiale avversione per le discipline umanistiche.

Conseguita la laurea in fisica al Massachusetts Institute of Technology nel 1939, presenta la sua candidatura a Princeton, dove viene accolto a braccia aperte per le sue formidabili qualità in fisica e matematica, e malgrado abbia voti oscenamente bassi in storia e in inglese.

A 21 anni, poco più che adolescente, si sceglie come relatore della tesi John Archibald Wheeler: un veterano, visto che di anni ne ha 28. E dopo aver conseguito il PhD, nel 1942, viene arruolato nel Progetto Manhattan, dove ha l'occasione di confrontarsi con alcuni dei più grandi fisici dell'epoca. Alla fine della guerra accetta un'offerta della Cornell University, dove entra come professore nell'ottobre 1945. Ha 27 anni.

E qui mi fermo, perché la vita e la fisica di Richard Feynman le trovate più avanti, in queste pagine. E anche perché mi viene



SPL/AGF

da pensare alla carriera parallela (qualche anno prima) di Enrico Fermi. Al quale nel 1926, a 24 anni, viene affidata la nuova cattedra di fisica teorica istituita alla «Sapienza» di Roma, segnando l'atto costitutivo di quell'incredibile gruppo di cervelli che tutti conosciamo come «i ragazzi di via Panisperna».

E ora facciamo un viaggio nel tempo di tre quarti di secolo. Italia, 2018. Su un totale di 12.975 docenti di prima fascia, appena 20 hanno meno di quarant'anni, mentre tra i professori associati gli under 40 sono 906 su 19.924. L'età media dei professori ordinari delle nostre università è di 59,3 anni.

Houston, abbiamo un problema.

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

Vinton Cerf
Chief Internet Evangelist, Google

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Richard Dawkins
fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Kaigham J. Gabriel
presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory

Harold Garner
direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Danny Hillis
co-presidente, Applied Minds, LLC

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Vinod Khosla
Partner, Khosla Ventures

Christof Koch
presidente dell'Allen Institute for Brain Science di Seattle

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Lawrence Lessig
docente, Harvard Law School

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore ordinario filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Eugenie C. Scott
Founding Executive Director, National Center for Science Education

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Shermer
editore, rivista «Skeptic»

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

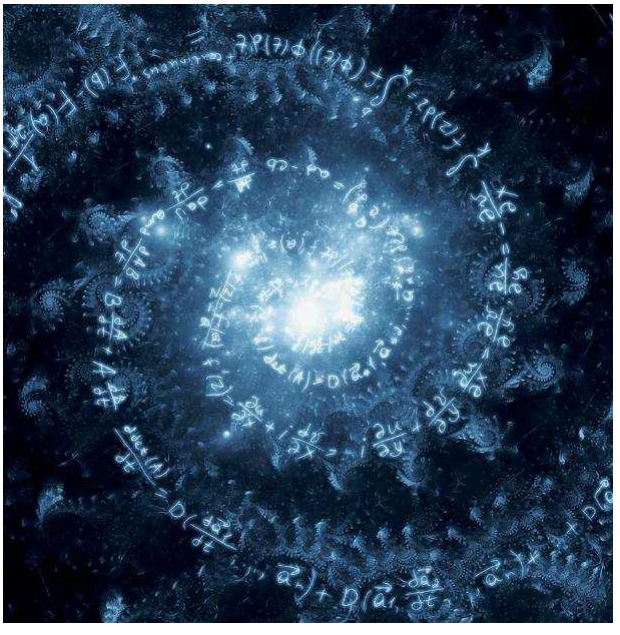
Jonathan Zittrain
docente di legge e computer science, Harvard University

La bellezza della matematica

A richiesta con «Le Scienze» di giugno, *L'equazione di Dio* di David Stipp

Ci sono equazioni matematiche che scatenano nella testa di chi le legge un godimento estetico, un piacere simile a quello che si può provare contemplando un'opera d'arte o ascoltando un brano musicale che rapisce fino a esaltare il nostro senso del bello. E non sono nemmeno formule complicate da mettere nero su bianco. Eppure, nella loro sinteticità, racchiudono significati e metafore matematiche che una volta svelate alimentano una sensazione di esaltazione.

In *L'equazione di Dio*, libro allegato con «Le Scienze» di giugno e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni, lo scrittore statunitense David Stipp racconta la nascita e il significato di una di queste opere d'arte della matematica, la formula di Eulero, illustrando il percorso che ha portato alla sua consacrazione scientifica ed estetica. C'è anche spazio per uno sguardo approfondito alla biografia del suo autore, il matematico svizzero Leonhard Euler, conosciuto appunto anche come Eulero, vissuto nel XVIII secolo: il più grande matematico dell'Illuminismo, che ha dato contributi importanti anche in astronomia e ingegneria. (Lo storico della scienza Clifford Truesdell, citato da Stipp, stima che Eulero abbia scritto un quarto di tutti i lavori matematici e scientifici pubblicati nel XVIII secolo.)



La formula di Eulero (chiamata anche identità di Eulero) protagonista del libro è la seguente: $e^{i\pi} + 1 = 0$. L'equazione deriva da una formula più generale, anch'essa dotata di un certo senso estetico, ma non attraente come l'identità appena descritta. La bellezza come la intende l'autore del libro in questo caso, non è solo la successione breve e ordinata di simboli, ma anche, forse soprattutto, il significato della formula, la capacità di veicolare più concetti in modo conciso e la combinazione di semplicità apparente e complessità nascosta. Dando un'occhiata un po' più in dettaglio, a sinistra dell'identità ci sono π ed e, la base dei logaritmi naturali: entrambe sono due costanti matematiche e sono indicate con lettere perché i loro valori sono infiniti; poi c'è i, l'unità immaginaria, definita come radice quadrata di -1, su cui si basano tutti i numeri immaginari. Eppure, una volta combinati, questi due infiniti e l'unità immaginaria collassano in un piccolo, semplice numero intero: -1. Dunque, cinque numeri scollegati, almeno in apparenza, di cui due di una complessità infinita, si combinano nella formula come tessere contigue di un puzzle, per dirla con Stipp.

Che tutto questo solleciti il senso del bello nel cervello degli esperti del settore è stato provato in un esperimento di qualche anno fa. A 15 matematici sono state mostrate 60 equazioni, tra cui quella di Eulero, mentre l'attività del loro cervello era monitorata. I risultati hanno mostrato che la formula di Eulero era quella che aveva attivato maggiormente le aree cerebrali associate a esperienze di bellezza visiva e musicale. In effetti, qualche anno prima la stessa formula era finita in cima a una *top ten* dei teoremi più belli stilata da esperti di matematica.

Ma come non di rado accade alle opere d'arte, la ricchezza delle implicazioni racchiuse nell'identità di Eulero, e nella formula generale da cui deriva, sono state comprese solo molti anni dopo la sua scoperta. Per esempio, nel XIX secolo è diventato chiaro che la formula generale di Eulero è assai utile per la modellizzazione del flusso delle correnti elettriche alternate, una delle linfe vitali della nostra vita quotidiana.

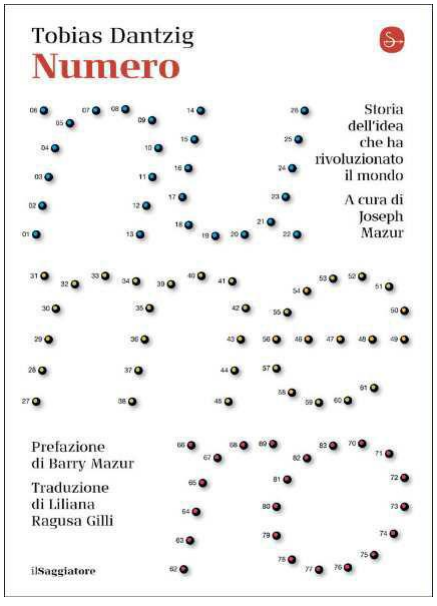
All'inizio, invece, sembrava solo un'astrazione senza corrispondenza alcuna con il mondo reale. Poi però si è rivelata incredibilmente adatta a rappresentare fenomeni fisici reali. È la matematica, bellezza.

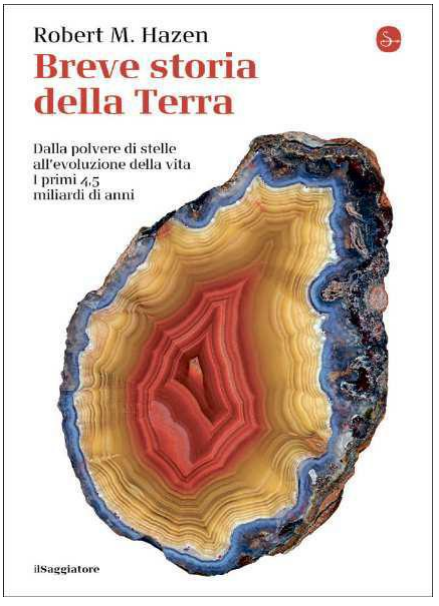
RISERVATO AGLI ABBONATI

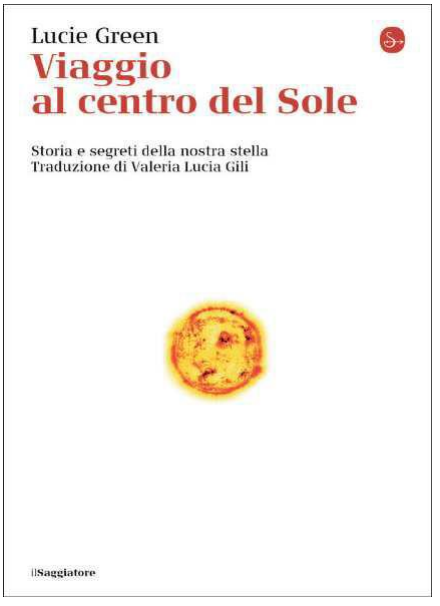
Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 9,00, incluso il prezzo di spedizione, telefonando al numero 0864.256266. La stessa offerta è valida per richiedere i volumi delle collane **I grandi della scienza a fumetti** e **I manga delle scienze**: in entrambi i casi gli abbonati possono acquistare i volumi al prezzo di € 9,90 incluse le spese di spedizione.

agsandrew/Shutterstock

NOVITÀ







ilSaggiatore

di Simona Regina

Un futuro quantistico per l'Europa

L'Unione Europea è in prima linea nello sviluppo delle tecnologie quantistiche grazie a un programma di investimenti miliardario, spiega Tommaso Calarco

Siamo alle soglie di una nuova rivoluzione industriale, o almeno così viene annunciata. Una rivoluzione basata sulle tecnologie quantistiche, che promettono velocità di calcolo senza precedenti, al punto da far sembrare lenti anche i supercomputer più potenti disponibili al momento. E quello che solo pochi anni fa sembrava fantascienza, oggi sta lentamente diventando realtà, coinvolgendo in una sfida a colpi di *qubit* il gigante dei motori di ricerca, i principali produttori di computer e scienziati di tutto il mondo. Anche l'Europa è in prima linea. «Nell'ambito del Programma Quadro di ricerca Horizon 2020, la Commissione Europea ha lanciato la nuova Flagship in Quantum Technologies», annuncia Tommaso Calarco, direttore dell'Istituto per sistemi quantistici complessi dell'Università di Ulm, in Germania, e primo firmatario del Quantum Manifesto, che detta una sorta di tabella di marcia per procedere nel nostro continente allo sviluppo di computer, telecomunicazioni e sensori super potenti.

Professore, di cosa si tratta?

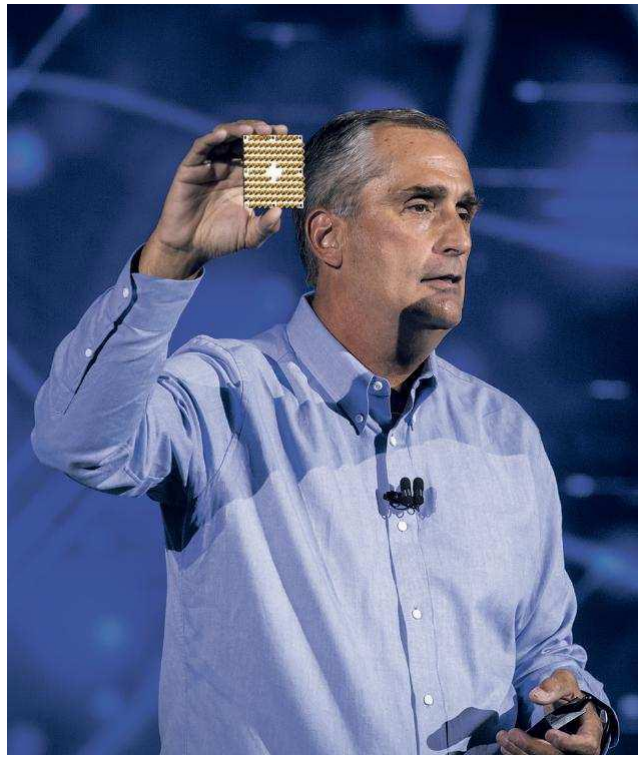
La Flagship in Quantum Technologies è un programma di ricerca decennale appena iniziato, che coinvolge praticamente tutti gli Stati membri dell'Unione Europea. L'obiettivo è creare un ecosistema europeo, sostenere la ricerca accademica e industriale, valorizzare e mettere in rete conoscenze e competenze al fine di sviluppare tecnologie quantistiche, portare queste tecnologie dai laboratori di ricerca al mercato. Un'iniziativa fondamentale per poter stare al passo con Corea del Sud, Cina, i grandi colossi industriali statunitensi, affinché non si ripetano gli errori del passato.

A quali errori si riferisce?

Si pensi per esempio a Internet: in fondo è nato nel cuore dell'Europa, al CERN di Ginevra, ma i benefici economici della grande rivoluzione del World Wide Web sono stati raccolti altrove. Questa volta l'Europa deve essere protagonista a pieno titolo di questa rivoluzione che si basa sulle leggi della fisica dell'infinitamente piccolo. Per farlo è fondamentale uscire dall'ottica dell'impresa nazionale: nessun singolo paese può farcela da solo, la cooperazione è essenziale per avere successo. E per il successo è fondamentale puntare sull'eccellenza.

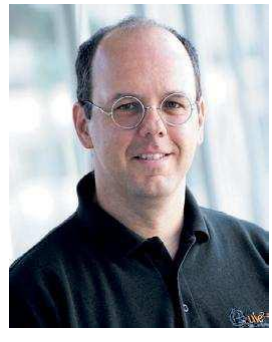
Lei ha avuto un ruolo decisivo nel convincere la Commissione Europea a investire in questa iniziativa. Si tratta di un'iniziativa da un miliardo di euro. Come ci è riuscito?

È stato fondamentale far capire che il mondo accademico e il tessuto industriale sono pronti a un grande sforzo collettivo e che la ricerca in questo ambito è davvero strategica per l'Europa, perché le applicazioni delle tecnologie quantistiche sono molteplici e possono avere un impatto rilevante per la società.



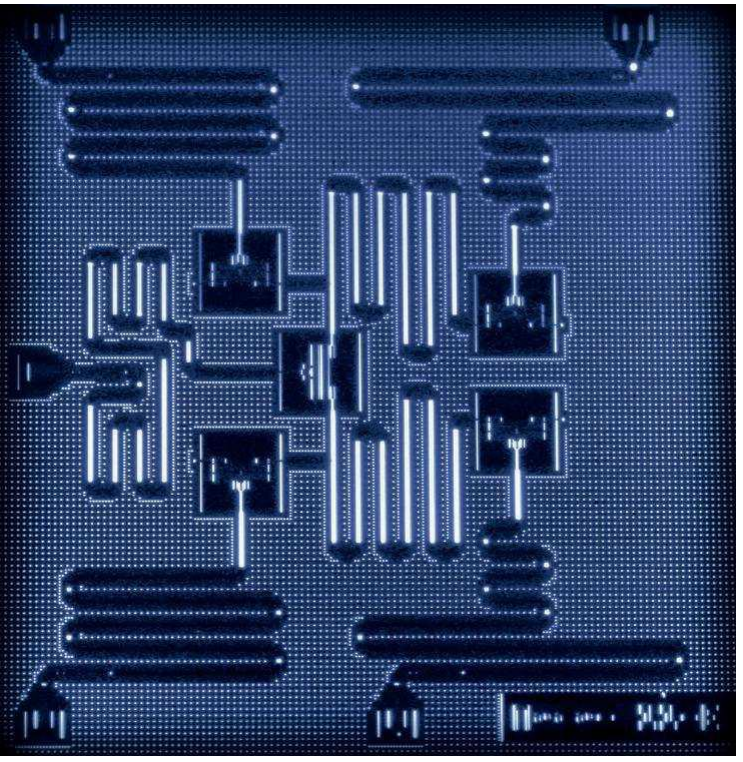
Cortesia Calarco (*Calarco*)

CHI È



Tommaso Calarco, classe 1969, di Rovereto, è un esperto di fisica quantistica e dal 2014 è direttore dell'Istituto per sistemi quantistici complessi dell'Università di Ulm, in Germania, e del Centro per le scienze e le tecnologie quantistiche dell'Università di Ulm, dell'Università di Stoccarda e del Max-Planck-Institut di Stoccarda.
Membro della Commissione di esperti della Quantum Technology Flagship della Commissione Europea, è presidente del comitato strategico del Q@ TN (Quantum at Trento), un centro per le tecnologie quantistiche nato grazie alla collaborazione tra Università di Trento, Fondazione Bruno Kessler e Consiglio Nazionale delle Ricerche.
Fin da ragazzo era affascinato dalla lettura di «Le Scienze», per cui è particolarmente fiero di questa intervista.

Verso il futuro.
Processore quantistico di IBM. Nella pagina a fronte, Brian Krzanich, CEO di Intel, mostra un processore a 49 qubit a inizio 2018.



David Paul Morris/Bloomberg via Getty Images (*Krzanich*); IBM Research/SPL/AGF (*processore*)

Ma di fatto che cosa sono le tecnologie quantistiche?

Sono tecnologie diverse – computer, simulatori, sensori, dispositivi di misurazione, telecomunicazioni sicure – che sfruttano gli effetti quantistici.

Qual è il principio alla base?

I computer attuali memorizzano ed elaborano le informazioni sotto forma di bit e ogni bit può rappresentare 0 o 1. I computer quantistici, invece, e più in generale le tecnologie quantistiche, memorizzano le informazioni in bit quantici, o qubit, che possono essere 0, 1 o una combinazione dei due. Perché a livello atomico una particella può esistere in molti stati contemporaneamente e, per di più, cambiando uno stato si può influenzare istantaneamente anche lo stato di altre particelle. Questo permette di processare molte più informazioni, molto più velocemente. Per questo in genere affermiamo che un computer quantistico sarà più efficiente e performante: il re del *multitasking*.

Quali sono le potenziali applicazioni?

Una volta operative, le tecnologie quantistiche potrebbero essere determinanti per lo sviluppo di nuovi materiali, per la messa a punto di sistemi di crittografia più sicuri e per migliorare le prestazioni delle auto a guida autonoma potendo, in quest'ultimo caso, garantire una precisione straordinaria nella misura del tempo.

Potrebbero avere applicazioni anche in ambito medico?

Certo, i sensori quantistici potrebbero rilevare con precisione l'attività del cervello ed essere usati per capire meglio il suo funzionamento o diagnosticare tempestivamente alcune malattie neurodegenerative. Ma non solo. A Boston, una *start-up* della Harvard University vuole sfruttare la capacità dei sensori di rilevare *in vivo* l'attività cellulare per diagnosticare precocemente alcune forme di tumori. Mentre un progetto pilota avviato lo scorso anno in Germania, che coinvolge anche l'istituto che dirigo all'Università di Ulm, mira allo sviluppo di sensori quantistici capaci di rilevare l'attività cerebrale per riuscire in futuro a comandare, praticamente con il pensiero, dispositivi come per esempio una sedia a rotelle.

Queste tecnologie potranno velocizzare anche il lavoro di ricerca degli scienziati?

Direi proprio di sì, e in fondo è già successo. La rilevazione delle onde gravitazionali, che ha rappresentato uno straordinario successo scientifico, è stata possibile anche grazie a un sensore quantistico che ha permesso di aumentare di dieci volte la precisione della misurazione. E le simulazioni quantistiche potranno offrire molto alla messa a punto di nuovi farmaci o la simulazione di reazioni chimiche, le cui proprietà sono determinate dalle interazioni tra atomi e molecole. Sono interazioni governate da fenomeni quantistici; una nuova generazione di simulatori, quindi, potrà simularle molto più velocemente rispetto a oggi potendo analizzare più rapidamente opzioni diverse. Google, per esempio, sta già lavorando su questo fronte per capire il funzionamento di nuovi composti chimici e creare nuovi fertilizzanti con un minore impatto sull'ambiente. La forza dei simulatori quantistici di fatto è nella possibilità di modellare ogni singolo atomo e le interazioni tra loro.

I qubit quindi possono codificare ed elaborare più informazioni rispetto ai bit. Ma di quanti qubit parliamo nel caso di un computer quantistico?

Un simulatore già con qualche centinaia di qubit può portare a risultati attualmente impensabili per la scienza dei materiali o la chimica. Un computer quantistico dovrebbe avere addirittura migliaia, se non milioni, di qubit.

E a che punto siamo?

È plausibile pensare che i sensori quantistici arriveranno sul mercato tra 3-5 anni, i simulatori tra una decina di anni, mentre per il computer quantistico l'attesa sarà più lunga, parliamo di circa 10-20 anni. Tutto ovviamente dipende da quanto si continuerà a investire. Adesso stiamo vivendo una fase davvero emozionante per la *quantum research*, con risultati molto incoraggianti. IBM e Google, per esempio, stanno lavorando per rendere il computer quantistico una realtà. Hanno messo a punto un chip quantistico ciascuno, rispettivamente a 50 qubit e 72 qubit: ci stiamo dunque avvicinando alla dimostrazione della cosiddetta *quantum supremacy*, cioè una capacità di calcolo impossibile da raggiungere con i computer tradizionali. Quindi direi che, sebbene non possiamo prevedere il futuro, è legittimo essere ottimisti.

di Letizia Gabaglio

Una miniera marina

Un ciclo integrato sviluppato dallo spin-off ResourSEAs permette di ottenere acqua dolce, sale, magnesio ed energia elettrica dall'acqua di mare

Le saline sono luoghi suggestivi, che raccontano la storia antica del rapporto fra esseri umani e natura. In questi luoghi da centinaia di anni la seconda viene plasmata per mano dei primi per ricavare sale dall'acqua marina. Dalle saline, un gruppo di ricercatori del Dipartimento di ingegneria dell'innovazione industriale e digitale dell'Università di Palermo sta immaginando di poter estrarre magnesio di altissima qualità e di produrre energia. L'idea è sviluppare un ciclo integrato dell'acqua. Oggi, con processi fra loro separati, l'acqua del mare è usata per estrarre acqua potabile, sale da tavola, minerali ed energia. Integrando questi processi, invece, si potrebbero eliminare gli scarti e usare meno risorse naturali, con un evidente risparmio economico e un minor impatto ambientale. Un'idea che sulla carta sembra funzionare ma che ha bisogno di essere provata sul campo, passo dopo passo.

Un laboratorio nel trapanese

Per prima cosa bisogna trovare un laboratorio a cielo aperto dove poter cominciare a dimostrare che funziona. I giovani ingegneri hanno scelto le più grandi saline del trapanese e, ormai dieci anni fa, hanno messo sotto esame il processo di dissalazione delle acque di mare e la salamoia di scarto che ne deriva. Oltre alle tonnellate di sale marino integrale estratte ogni anno, infatti, i ricercatori siciliani sono convinti che dalle vasche possano essere ricavati anche altri prodotti.

«Abbiamo prima studiato il processo di dissalazione dell'acqua marina e così abbiamo capito che lo scarto della lavorazione, una salamoia che generalmente è gettata nuovamente in mare, poteva essere usato per alimentare le saline», racconta Maurizio Bevacqua, uno dei ricercatori che lavora al progetto. In questo modo si ottengono due vantaggi: si evita di dover buttare lo scarto della dissalazione in mare, risparmiando denaro e inquinando meno, e allo stesso tempo si possono alimentare le saline con un'acqua salata così concentrata da aumentarne la produttività fino al 30 per cento. «Per 4-5 anni abbiamo testato questo processo, dimostrando che può funzionare. Ma ci siamo accorti anche di un'altra cosa: le saline a loro volta hanno uno scarto che può essere sfruttato al meglio», continua l'ingegnere che insieme ad alcuni colleghi si è messo quindi a lavorare sullo scarto dello scarto, scoprendo che si tratta di una vera miniera di magnesio: fino a 40 grammi per litro contro i 1,3-1,5 grammi che si trovano nell'acqua marina. Non solo ce ne è tanto, ma è anche di buona qualità.

«La salina fa precipitare gli altri ioni quindi quelli di magnesio rimangono disponibili in grandi quantità», va avanti Bevacqua. «Il processo di recupero che abbiamo sviluppato ci permette di produrre idrossido di magnesio puro al 100 per cento, le cui caratteristiche lo rendono un ingrediente particolarmente appetibile per il mercato dei ritardanti di fiamma, della farmaceutica e della nutraceutica». Ed è qui che il gruppo di ricerca si trasforma in uno *spin-off*, ResourSEAs, che Bevacqua costituisce insieme ad Andrea Cipollina, Giorgio Micale, Alessandro Tamburini e Michail Papapetrou a metà 2017.

Per avere un'idea del *business* basti pensare che se la tecnologia dei giovani ingegneri siciliani fosse applicata a tutte le saline del bacino del Mediterraneo, se ne ricaverebbe una quantità di

LA SCHEDA

ResourSEAs

Fatturato n.d.	Investimenti in ricerca n.d.
Dipendenti/collaboratori n.d.	Brevetti rilasciati n.d.

Cortesia dell'autore (2)

Riciclare. Mucchi di sale ottenuti per evaporazione dell'acqua di mare in una salina vicino Trapani. A fronte in alto, il gruppo fondatore dello spin-off ResourSEAs; sotto, polvere di magnesio ottenuta dallo scarto della dissalazione grazie al processo sviluppato da ResourSEAs.

magnesio pari al 20 per cento di quello prodotto oggi nel mondo. Il potenziale di ResourSEAs è tale che lo spin-off vince la Start Cup di Palermo, poi quella siciliana, arrivando al Premio nazionale dell'innovazione del 2016, dove si aggiudica il primo posto nella categoria *industrial*.

Progetto in espansione

«Stiamo sviluppando un primo impianto prototipo in prossimità delle principali saline di Trapani in modo da poter usare le salamoie di scarto. Il nostro magnesio è un prodotto paragonabile al migliore attualmente sul mercato in termini di purezza, e nei prossimi mesi siamo sicuri di riuscire a modificarne la morfologia in modo da ottenere il top di gamma fra quelli usati per i ritardanti di fiamma. Un magnesio ottimo ottenuto dal sole e dall'acqua di mare senza usare sostanze pericolose», sottolinea Bevacqua.

La stessa sostanza può essere usata anche per integratori alimentari o nell'industria metallurgica, in agricoltura e nelle costruzioni. Ma gli ingegneri di ResourSEAs non si sono accontentati e sono andati avanti nello sfruttamento delle acque che ai più sembrano solo scarti, e hanno deciso di lavorare sui gradienti salini, la differenza cioè di concentrazione di sale fra l'acqua di scarto delle saline e quella dolce. «Mescolando soluzioni con concentrazioni diverse grazie al processo di elettrodialisi inversa riusciamo a generare correnti elettriche di ioni, producendo elettricità», dice Bevacqua. «Con i finanziamenti provenienti da un progetto europeo, abbiamo realizzato un impianto pilota, il primo al mondo, nei pressi delle saline di Ettore e Infersa a Marsala che, sfruttando le salamoie di scarto e l'acqua salmastra presente, ha prodotto 1 chilowattora di energia elettrica». È ancora un prototipo, ma i risultati sono davvero incoraggianti.

Lo spin-off nel frattempo ha già attivato diversi contratti, anche a livello internazionale, con aziende interessate a sapere se è possibile valorizzare i loro scarti. Gli ingegneri siciliani sono chiamati per studi di fattibilità e prestano la loro consulenza in un campo in espansione costante. Nel frattempo, a dicembre scorso, hanno vinto anche il Premio dei premi, consegnato dall'allora presidente della Camera Laura Boldrini.

Il futuro? Andare avanti sul fronte della ricerca e dello sviluppo. Forti dell'esperienza dei cinque progetti di ricerca europei portati avanti con il gruppo dell'Università di Palermo, i ricercatori di ResourSEAs puntano ora a partecipare a un bando per le piccole e medie imprese scrivendo loro stessi un progetto e chiamando a raccolta altre realtà del panorama tecnico-scientifico internazionale complementari alla loro. Le saline sono un luogo davvero suggestivo, dove si può leggere l'innovazione del passato ma anche immaginare e provare a realizzare quella del futuro.

Tommaso Di Girolamo/Agf

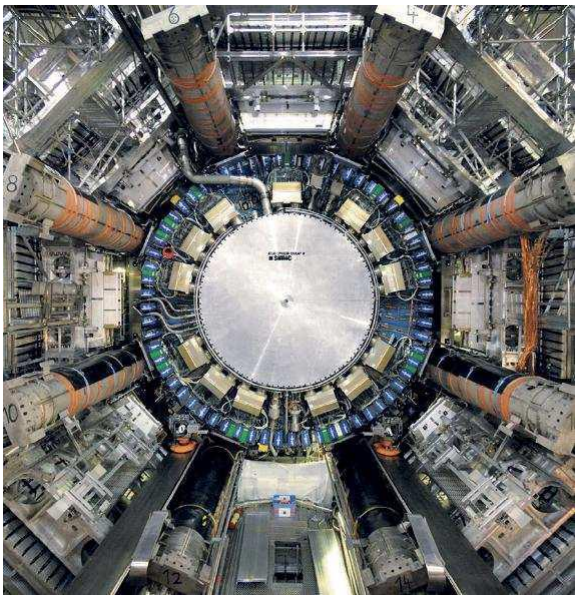
di Elena Castellani
professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Una controversa naturalezza

Le alterne vicende di una nozione-guida della fisica fondamentale

Come la storia della scienza insegna, nella pratica scientifica può succedere che alcune nozioni subiscano una specie di parabola: sono introdotte in un ambito specifico, ai fini di risolvere un determinato problema, per poi assumere un significato molto più generale e spesso diventare, proprio per questo, controverse. Un esempio recente è la vicenda della «naturalezza», che nasce come nozione tecnica per poi diventare un principio generale nell'ambito della fisica fondamentale dagli anni settanta a oggi.

A differenza di quanto il termine «naturalezza» potrebbe far pensare in base al suo uso nel linguaggio comune, nella fisica delle particelle la nozione ha inizialmente un significato molto specifico, relativo ad aspetti tecnici inerenti alla formulazione teorica adottata, cioè la teoria quantistica dei campi. La problematica era quella delle correzioni quantistiche da apportare ai parametri fondamentali della teoria, tra cui per esempio la massa delle particelle, in modo da ottenere valori finiti anche alle scale più alte di energia: quello che in fisica si chiama la «rinormalizzazione» della teoria. La richiesta era che queste correzioni avvenissero in «modo naturale», cioè senza necessità di aggiustamenti eccessivi e quindi «innaturali» del parametro di partenza al variare della scala fisica (nel passare da «basse energie» ad «alte energie»), aggiustamenti difficili da giustificare.



Cacciatore di particelle. Il rivelatore ATLAS di LHC ha contribuito alla rilevazione del bosone di Higgs.

Il problema si poneva in particolare rispetto ai valori della massa di particelle descritte da campi scalari (cioè con valore nullo di spin), come il famoso bosone di Higgs: in questi casi, le correzioni quantistiche previste per la validità della teoria al variare della scala fisica potevano essere di tale entità da porre appunto un problema di naturalezza.

Aggiustamenti così innaturali nella descrizione fisica vanno indubbiamente contro i criteri di semplicità ed eleganza, e questo spiega perché la richiesta di naturalezza venga spesso assimilata a un controverso uso di criteri estetici nella scienza. In realtà, il criterio della naturalezza riposa su motivazioni più sostanziali. Sono in gioco gli ingredienti principali e le idee-guida della fisica delle particelle così come si è sviluppata dagli anni settanta in poi, con la costruzione del modello standard delle particelle e gli studi per estenderlo oltre i suoi limiti. In particolare, la naturalezza è collegata alla richiesta che le proprietà osservabili della teoria (cioè a bassa energia) siano stabili rispetto a piccole variazioni dei parametri fondamentali, o, altrimenti detto, che sia possibile separare gli effetti di quanto succede ad alte energie dalla descrizione a basse energie. In sostanza, in teorie «naturali» i fenomeni fisici a bassa energia non dovrebbero dipendere in modo sensibile dai fenomeni ad alte energie. Si tratta di un criterio ragionevole, che ha guidato gran parte dell'elaborazione teorica degli ultimi decenni e su cui si basa l'approccio dominante nella fisica delle particelle: quello che vede le teorie dei campi del modello standard come «teorie effettive», cioè teorie che sono approssimazioni a basse energie di una teoria più fondamentale.

Il problema per questo criterio, diventato negli ultimi decenni un vero e proprio principio metodologico, è che, per quanto ragionevole e giustificato, non è del tutto rispettato sia nella fisica delle particelle elementari sia in altri settori della fisica. Per quanto riguarda in particolare il modello standard, i problemi di naturalezza si sono acuiti con i risultati ottenuti al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra: il valore della massa del bosone di Higgs osservato nel 2012, e il fatto che ancora non siano state osservate nuove particelle la cui presenza potrebbe servire a rimediare alcuni aspetti «innaturali» dell'impianto teorico dominante (per esempio, le particelle previste in base alla supersimmetria), sono segnali che non vanno nella direzione indicata dal criterio di naturalezza. Questo ha portato ultimamente a una messa in discussione della nozione, a volte anche radicale.

Alla luce dei recenti risultati sperimentali e dei problemi teorici non risolti, il ruolo della naturalezza, per quanto sia stato rilevante, deve quindi essere ridefinito, aggiustato o abbandonato? La discussione è accesa, e c'è chi, come il fisico Gian Francesco Giudice, attuale direttore della divisione teorica del CERN, ha addirittura parlato della necessità di un nuovo paradigma nella ricerca fondamentale in un articolo del 2017 dal titolo evocativo *The Dawn of the Post-Naturalness Era*.

Cortesia Claudia Marcelloni/CERN

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Affetto e DNA

L'assenza di cure materne lascia una traccia nel genoma dei topi. E negli esseri umani?

Abbiamo sempre saputo, essenzialmente perché ci è stato sempre detto, che un individuo che ha sofferto nella prima infanzia di mancanza d'affetto da parte dei genitori, più spesso della madre, avrà da adulto una serie di problemi comportamentali e affettivi che denunciano un fondamentale stato di insicurezza e di ansia, con qualche difficoltà anche nei processi d'apprendimento. Questo ci dicevano etologia e psicologia. La cosa ha un certo senso per gli animali ed è spesso confermata dall'esperienza con i nostri simili. In tempi recenti si è cercata una conferma di questa convinzione, possibilmente sotto forma di una spiegazione molecolare. E la si è trovata. Operando sui topi di laboratorio, si è visto qualche tempo fa che ci sono processi epigenetici a carico dei cuccioli deprivati di affetto, non di quelli «curati» a sufficienza dai genitori.

Adesso è riportato un nuovo dato di natura un po' diversa, ma forse ancora più sorprendente (Bedrosian T.A. e collaboratori, in «Science», Vol. 359, pp. 1395-1399). Nei cromosomi delle cellule dell'ippocampo che si stanno dividendo, e solo di quelle, di un topo deprivato d'affetto si accumulano a poco a poco un certo numero di mutazioni che non si osservano nell'ippocampo di topi ben trattati. La cosa ancora più sorprendente è la natura di queste mutazioni. I geni mutati sono interrotti da una sequenza corta di DNA a loro estranea; questa sequenza non è una qualsiasi, ma appartiene a una famiglia di sequenze di DNA mobili presenti normalmente nel genoma, e chiamata famiglia *L1*, che nel topo è il 17 per cento dell'intero genoma!

Si sa da tempo che i genomi dei mammiferi sono pieni di sequenze «morte» che ogni tanto si possono risvegliare. Di che si tratta? Di carcasse di virus (con un genoma di DNA) o di retrovirus (con un genoma di RNA) che sono rimaste imprigionate e «congelate» nel genoma. Si tratta di DNA non diverso dall'altro e può essere «impiegato» per funzioni evolutive come tutto l'altro, ma di tanto in tanto qualcuna di queste sequenze si ricorda chi era, si muove, si «autotraspone» ed emigra altrove nel genoma della cellula, in genere causando danni, ma non è sempre detto.

L'inserzione delle sequenze *L1* non può riguardare alla stessa maniera tutte le cellule dell'ippocampo di un topo: alcune cellule saranno interessate al fenomeno, altre no. Di conseguenza quei topi che sono stati trascurati dalla madre sono tecnicamente dei mosaici genetici, ovvero organismi che portano alcune cellule con un certo tipo di genoma e altre con un altro tipo, anche se i due tipi possono non essere molto diversi fra di loro. Non sappiamo ancora quale può essere l'effetto delle diverse inserzioni di sequenze *L1* sulle singole cellule e sull'intero ippocampo in via di sviluppo, e soprattutto non sappiamo quanto possono essere estese alla nostra specie le osservazioni effettuate su topi di laboratorio.

Quest'ultimo interrogativo è particolarmente appropriato oggi, perché assai di recente si è visto che nei topi vengono generati nuovi neuroni anche in età adulta, mentre nell'essere umano no. Se c'è una cosa che potrebbe essere diversa fra esseri umani e topi è proprio il funzionamento del cervello. E non è detto che le due osservazioni non siano collegate.

Nelle cellule dell'ippocampo, e solo in quelle, di topi deprivati d'affetto si accumulano mutazioni in sequenze di DNA che possono migrare nel genoma.

Il fenomeno osservato è parzialmente reversibile. Fornendo ai topi una madre addizionale durante il periodo di deprivazione affettiva, si osserva un certo ricupero della situazione di partenza. E non è necessario che si tratti della madre naturale; può trattarsi di una buona madre qualsiasi. A guardare più a fondo si osserva anche un fenomeno di più generale modifica del genoma. Insomma la natura vuole essere sicura di ciò che fa. A che scopo lo fa? Vuole condannare definitivamente chi sta soffrendo o lo vuole aiutare a riprendersi, magari nel tempo?

Ancora non lo sappiamo e sarà molto interessante scoprirlo, perché le «finalità» della natura sono spesso diverse da quelle che noi ci figuriamo.

D-Keine/iStock

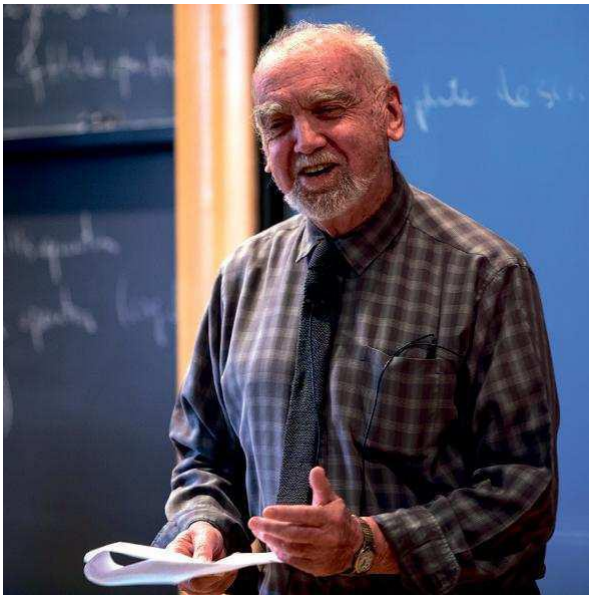
di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

Questo è tutto un programma

Teoria della rappresentazione e teoria dei numeri protagoniste del premio Abel

Il titolo di un libro di Ed Regis di qualche anno fa era *Chi si è seduto sulla sedia di Einstein?* (Frassinelli, 1990), da intendersi ovviamente in senso metaforico, e non letterale. Cioè, domandandosi profondamente chi ha ereditato il ruolo intellettuale di Albert Einstein nella fisica d'oggi, e non banalmente chi ha ereditato il suo ufficio all'Institute for Advanced Study di Princeton. La domanda letterale invece non esprime altro che una curiosità da *gossip*, ma per la cronaca la risposta è: il matematico canadese Robert Langlands.

Il quale non è sicuramente l'erede intellettuale di Einstein, ma altrettanto sicuramente è un matematico di prim'ordine. Riceve infatti il 22 di questo mese il premio Abel, considerato una sorta di premio Oscar alla carriera, per «il suo visionario programma che connette la teoria della rappresentazione alla teoria dei numeri». E in passato aveva già vinto per lo stesso motivo il premio Wolf (il Nobel israeliano) nel 1996 e il premio Shaw (il Nobel orientale) nel 2007.



Di prim'ordine. Robert Langlands, matematico canadese premio Abel 2018.

Il cosiddetto «programma di Langlands» è una serie di congetture che l'allora giovane matematico enunciò nel 1967 in una lettera manoscritta di 17 pagine, indirizzata al mostro sacro André Weil. Quest'ultimo, notoriamente di carattere scontroso e difficile, la trovò così interessante che la fece battere a macchina e fotocopiare perché potesse circolare più agevolmente tra gli addetti ai lavori. Oggi, nell'era informatica, la si trova facilmente in rete in entrambe le versioni, manoscritta e dattiloscritta.

Il programma abbozzato nella lettera è una specie di grande teoria unificata della matematica moderna, e le conferme di alcuni suoi punti hanno già portato a grandi risultati. In particolare, nel 1995, alla dimostrazione dell'ultimo teorema di Fermat da parte di Andrew Wiles, a sua volta vincitore del premio Abel lo scorso anno. E, nel 2002 e nel 2010, alle medaglie Fields assegnate rispettivamente a Laurent Lafforgue e Ngo Bao Chau.

Le scoperte di inaspettate connessioni tra concetti o campi apparentemente slegati fra loro hanno sempre costituito dei grandi passi avanti per l'approfondimento e l'avanzamento della matematica, e hanno sempre portato fama e onore a coloro che hanno avuto la capacità e la fortuna di trovarle. Un esempio classico è il risultato di Archimede che lega fra loro quattro costanti di proporzionalità che, prima di lui, sembravano apparentemente slegate.

Euclide aveva infatti dimostrato che in un cerchio la circonferenza è proporzionale al raggio ($C = ar$) e l'area al raggio al quadrato ($A = br^2$), e che in una sfera la superficie è proporzionale al raggio al quadrato ($S = cr^2$) e il volume al raggio al cubo ($V = dr^3$). Ma Archimede scoprì che esiste un'unica costante π che permette di esprimere tutte e quattro le formule per la circonferenza e l'area del cerchio ($C = 2\pi r$ e $A = \pi r^2$), e la superficie e il volume della sfera ($S = 4\pi r^2$ e $V = 4/3\ \pi r^3$).

Queste formule costituiscono una parte sostanziale del lascito intellettuale di Archimede, che lo rende il più grande matematico dell'antichità, e mostrano che esiste un legame tra due discipline apparentemente slegate fra loro, come la geometria euclidea e il calcolo infinitesimale. Quest'ultimo fu infatti usato per la prima volta e in forma primordiale da Archimede, proprio per dimostrare i risultati citati.

Fin dalle prime righe della sua lettera Langlands fa riferimento invece al legame tra il calcolo infinitesimale e l'aritmetica finita, notato questa volta da Eulero nel Settecento. La sua scoperta fu una dimostrazione del famoso teorema di Euclide sull'infinità dei numeri primi, a partire dal fatto che la somma degli inversi dei numeri interi è infinita: in termini tecnici, che la cosiddetta «serie armonica» diverge.

Il nucleo della dimostrazione di Eulero sta nella trasformazione della somma infinita degli inversi degli interi in un prodotto infinito di fattori, legati ai vari numeri primi: un tipico esempio dei *Euler Products* (Yale University Press, 1967) che costituirono l'argomento del primo libro di ricerca di Langlands. E il nucleo del suo programma riguarda appunto una serie di congetture che approfondiscono il legame tra l'analisi armonica e la teoria dei numeri, a cui appartengono rispettivamente la serie armonica e i numeri primi. A dimostrazione della profonda unità che esiste tra le varie branche della matematica, anche quelle a prima vista slegate e lontane fra loro.

Cortesia Dan Komoda/Institute for Advanced Study

di Amedeo Balbi
Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

L'universo, spiegato da Stephen

I risultati di Hawking hanno ispirato almeno due generazioni di scienziati

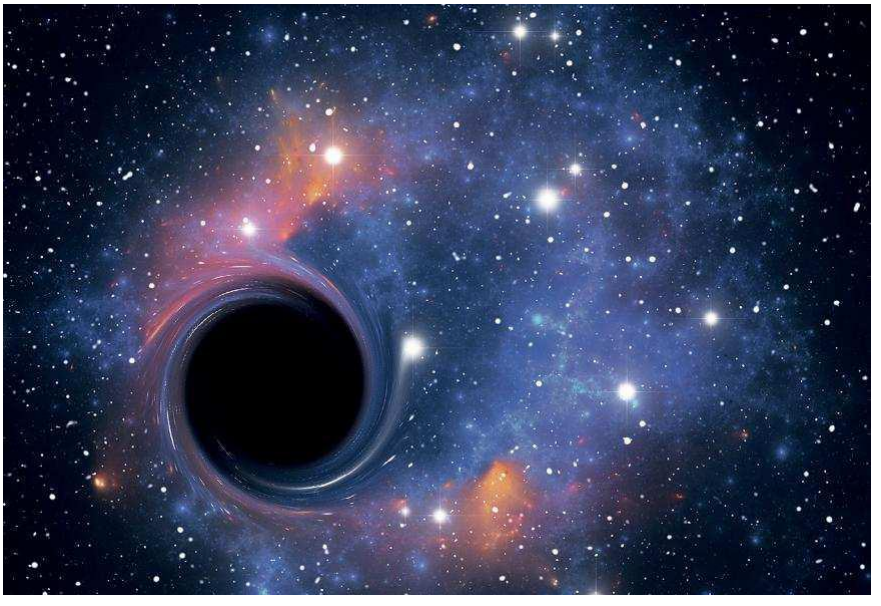
Con la scomparsa di Stephen Hawking, il mondo scientifico ha perso certamente uno dei suoi più popolari rappresentanti presso il grande pubblico. Ma Hawking non è stato solo un personaggio pubblico influente, la cui voce e la cui presenza hanno contribuito a creare curiosità e interesse nei confronti della scienza. È stato anche un brillante ricercatore, che ha ottenuto risultati importanti da cui sono nati interi filoni di ricerca, e che hanno ispirato il lavoro di almeno due generazioni di scienziati.

Il lavoro di Hawking è stato pionieristico e innovativo innanzitutto per la scelta del campo a cui ha dedicato gran parte delle sue energie: ovvero la gravità quantistica, il terreno di sovrapposizione tra l'eleganza geometrica della teoria einsteiniana della relatività generale e la paradossale efficacia della meccanica quantistica. Un terreno labirintico e pieno di ostacoli, di cui nessuno, per il momento, è riuscito a trovare una mappa completa. Hawking vi ha aperto strade nuove, forse provvisorie, ma che potrebbero aver permesso di fare passi avanti nella giusta direzione.

Due sono le situazioni fisiche note in cui relatività generale e meccanica quantistica sono costrette a un matrimonio forzato (e finora decisamente infelice): i buchi neri e l'origine dell'universo. In entrambi i casi, Hawking ha ottenuto risultati di enorme rilevanza. Il primo, a cui Hawking ha iniziato a lavorare quando era ancora uno studente di dottorato, generalizzava un teorema ottenuto da Roger Penrose. Penrose aveva dimostrato che il collasso gravitazionale di una stella massiccia provoca una singolarità nello spazio-tempo, un punto di densità infinita che la fisica nota non può descrivere adeguatamente. Hawking dimostrò che qualcosa di simile potrebbe essere avvenuto all'inizio della storia dell'universo: in questo caso, come in un film a ritroso, la singolarità è l'avvio di un'espansione, non il termine di un collasso.

Il risultato più noto e certamente più importante di Hawking (e quello che egli stesso preferiva) riguarda l'evaporazione dei buchi neri. Hawking dimostrò che un buco nero non è completamente nero, ma emette in realtà una debole radiazione termica (oggi nota, appunto, come radiazione di Hawking), come qualunque altro oggetto caldo nell'universo. Questo porta i buchi neri a «evaporare» con il passare del tempo. Da questo risultato inatteso sono scaturiti problemi profondi e ancora irrisolti, come quello che riguarda la sorte dell'informazione che entra in buco nero. L'esistenza stessa di questi problemi è un chiaro indizio della necessità di superare la relatività generale, la meccanica quantistica, o entrambe.

Un'altra idea innovativa di Hawking, sviluppata assieme a James Hartle, era che l'universo potesse non avere confini nel tempo, così come non ne ha nello spazio. È un'idea spesso popolarizzata, anche dallo stesso Hawking, con l'immagine del Polo Nord: come non ha senso chiedersi che cosa c'è più a nord del Polo Nord, nel modello di Hartle-Hawking non c'è un tempo «prima» del big bang.



Pasieka/SPL/Getty Images

Il più noto e importante dei risultati di Hawking è stata la dimostrazione che i buchi neri non sono del tutto neri, ma emettono una debole radiazione termica, chiamata ora con il suo nome.

L'ultimo lavoro di Hawking, in collaborazione con Thomas Hertog, era stato revisionato appena due settimane prima della morte dello scienziato (lo si trova sul sito arXiv.org, con il titolo *A Smooth Exit from Eternal Inflation*). Aveva a che fare ancora una volta con l'origine dell'universo, e riprendeva proprio la proposta *no-boundary* di Hartle e Hawking, adattandola a uno scenario teorico oggi popolare in cosmologia, che prevede l'esistenza di molteplici universi e di una fase inflazionaria di espansione accelerata dopo il big bang.

Forse non si tratta di un lavoro che rimarrà nella storia della scienza, ma testimonia la vitalità scientifica, fino alla fine, di una delle più grandi menti del nostro tempo.

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Un orecchio per le migrazioni

La forma del labirinto contiene importanti informazioni sulla diffusione dell'umanità

All'interno del nostro orecchio, in una struttura chiamata «rocca petrosa», abbiamo un vero e proprio labirinto osseo: un sistema di piccole cavità che ospitano i sensi dell'udito e dell'equilibrio. Ci è già capitato di parlare di questo insieme di strutture miniaturizzate e potenti, a proposito di ricerche su ossicini dell'udito rinvenuti in fossili di *Australopithecus* o di *Homo*. Negli ultimi anni, inoltre, si è affermata fra i ricercatori la convinzione che questa regione della base del cranio, incorporata in un denso tessuto osseo, sia una di quelle che meglio conservano porzioni leggibili di DNA antico.

Ora abbiamo i risultati di una ricerca che usa il labirinto dell'orecchio interno per una finalità inedita: analizzare le rotte di diffusione delle popolazioni di *Homo sapiens*. È stata pubblicata di recente sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», a firma di un composito gruppo di morfologi e paleoantropologi con il coordinamento dell'Università di Zurigo.

I ricercatori sono partiti dalla considerazione che il labirinto osseo è completamente formato dalla nascita e si presenta di solito ben conservato nei resti scheletrici, rappresentando così una fonte di informazioni morfologiche sulle popolazioni del passato. Per analizzarlo, hanno proceduto a una registrazione dei dati attraverso tomografia computerizzata (quella che tutti chiamiamo TAC) ad alta risoluzione, che sappiamo essere una tecnica ormai ampiamente usata in paleoantropologia per ottenere dati tridimensionali di strutture ossee e dentarie in formato digitale.

Gli scienziati hanno così esaminato oltre 200 campioni ossei, rappresentativi di più di 20 popolazioni distribuite su tutto il pianeta e di varia antichità. Dopo la scansione tomografica 3D, li hanno analizzati con tecniche di morfometria geometrica e confrontati con i dati genetici e con la distribuzione geografica delle stesse popolazioni. La ricerca ha mostrato che la morfologia del labirinto osseo dell'orecchio interno tiene traccia delle distanze genetiche e della geografia, in base a un modello di isolamento a distanza e differenziamento delle popolazioni che si sono originariamente diffuse dall'Africa.

Gli autori hanno dunque scoperto che la forma tridimensionale del labirinto contiene importanti informazioni sulla diffusione globale dell'umanità moderna. Più una popolazione è lontana geograficamente dal Sudafrica o dall'Africa orientale, più la forma del labirinto differisce rispetto a quella delle popolazioni di quelle aree. Non solo: i risultati sono anche compatibili con i movimenti della popolazione all'interno dei continenti. I dati del labirinto dunque si affiancano coerentemente a quelli del DNA. Se ne possono trarre così informazioni sulla storia umana, anche in assenza di dati genetici.

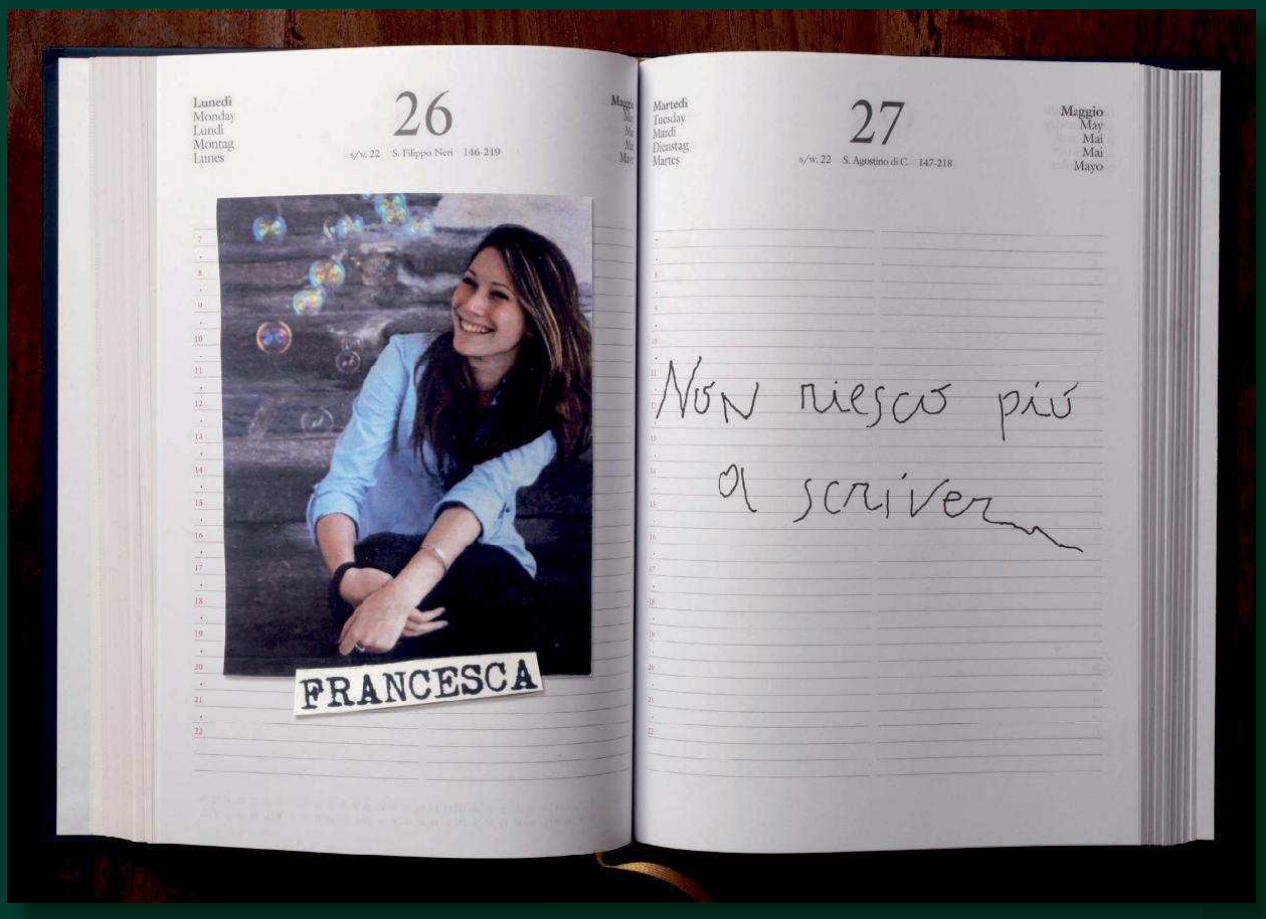
Sono conclusioni sorprendenti perché in precedenza si riteneva che la forma del labirinto fosse determinata principalmente dalla sua funzione. È stato ora dimostrato, invece, che la natura tollera variazioni sorprendentemente ampie nella struttura del labirinto, che sono dovute a cambiamenti casuali nel patrimonio genetico, fornendo una registrazione della storia della dispersione umana e dell'evoluzione.

Distanze labirintiche. Più una popolazione è distante dal Sudafrica o dall'Africa orientale, più la forma del labirinto osseo differisce da quella delle popolazioni di quelle aree.

Infine, poiché le ossa della cosiddetta rocca petrosa sono diventate i principali bersagli per l'estrazione del DNA antico, i ricercatori del nuovo studio suggeriscono che sarebbe opportuno acquisire dati 3D ad alta risoluzione prima di procedere a ricerche distruttive della struttura ossea. Questa procedura porterebbe alla formazione di un importante archivio delle variazioni morfologiche nelle popolazioni passate e presenti, che consentirebbe confronti tra la morfologia del labirinto osseo (dimostratasi ora così informativa) e il genotipo dei medesimi individui.

Non hanno torto.

Henrik Sorensen/Getty Images



DONA IL TUO 5X1000 AD AISLA ONLUS PER FAR CONTINUARE LA STORIA DI FRANCESCA E QUELLA DI TUTTI I MALATI DI SLA.

SOSTIENI LA RICERCA, SOSTIENI LE LORO FAMIGLIE.

Firma Mario Rossi

Codice fiscale del beneficiario

9	1	0	0	1	1	8	0	0	3	2

Sostegno del volontariato e delle altre organizzazioni non lucrative di utilità sociale, delle associazioni di promozione sociale e delle associazioni e fondazioni riconosciute che operano nei settori di cui all'art. 10, c. 1, lett a), del D.Lgs. n. 460 del 1997

ISTITUTO ITALIANO DONAZIONE
ID
DONARE CON FIDUCIA

WWW.AISLA.IT

aisla ONLUS
ASSOCIAZIONE ITALIANA SCLEROSI LATERALE AMIOTROFICA
PERSONE CHE AIUTANO PERSONE.

Y&R

Oggi puoi leggere Le Scienze direttamente su iPad.

La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

Le Scienze

SVILUPPO SOSTENIBILE

Migliorare l'agricoltura cinese

Un enorme progetto sperimentale ha dato ottimi risultati anche per l'ambiente

Pakin Songmor/Getty Images

Mobilitare le masse. La campagna nazionale promossa da Pechino ha coinvolto oltre 20 milioni di agricoltori ed è stata messa in pratica con il contributo di 200.000 fra tecnici e funzionari: un'impresa difficilmente realizzabile da strutture governative e statali diverse da quella cinese.

Produrre più riso, grano e mais abbattendo l'uso di fertilizzanti, i costi e l'impatto ambientale. E non in qualche lotto sperimentale, ma su una scala davvero larga, dimostrando di poter incidere sull'economia e l'ambiente di un grande paese e forse dell'intero pianeta.

È il progetto presentato su «Nature» da un vasto gruppo di ricercatori guidati da Cui Zhenling, della China Agricultural University di Pechino: una campagna nazionale che per dieci anni ha raccolto e analizzato dati su una serie di pratiche agricole a ogni latitudine del paese, ha studiato come migliorarle, e ha sperimentato le innovazioni sul campo, coinvolgendo oltre 20 milioni di agricoltori.

«Due miliardi e mezzo di piccoli coltivatori lavorano il 60 per cento delle terre arabili al mondo. I loro risultati sono essenziali non solo per le loro famiglie ma per la sicurezza alimentare e la salute degli ecosistemi del pianeta. E poiché si stima che dal 2005 al 2050 la produzione globale di cibo dovrà raddoppiare, è essenziale aumentare le rese salvaguardando l'ambiente», rimarca Zhenling.

Per sfamare l'immensa popolazione, la Cina usa fertilizzanti azotati a tassi quadrupli della media mondiale, con grossi problemi di inquinamento ed emissioni di gas serra. Il progetto mirava quindi ad aumentare le rese riducendo i consumi di fertilizzante. Zhenling ha prima catalogato una varietà di pratiche di coltivazione di grano, mais e riso adottate nel paese, ad alto o basso apporto di fertilizzanti, con rese buone o scadenti, nelle zone e nei climi più diversi. Per ciascuna situazione ha poi sperimentato modifiche delle varietà adottate, di tempi e spaziatura delle colture, dell'apporto di acqua e fertilizzanti, verificando gli effetti di queste e altre variabili.

Individuate le pratiche più adatte, un migliaio di ricercatori le ha diffuse con l'aiuto di 200.000 tecnici, funzionari e operatori agricoli, vincendo via via l'iniziale diffidenza. Con esiti impressionanti, a detta degli esperti.

Dal 2006 al 2015 la produzione media delle tre colture è cresciuta dell'11 per cento mentre il consumo di azoto è calato del 15 per cento. A tutto vantaggio dei contadini, che hanno guadagnato 12 miliardi di dollari in più, ma anche dell'ambiente, poiché le dispersioni di composti azotati nel suolo, nell'acqua e in atmosfera sono calate, riducendo per esempio del 13 per cento le emissioni di gas serra. Il tutto al costo di circa 54 milioni di dollari.

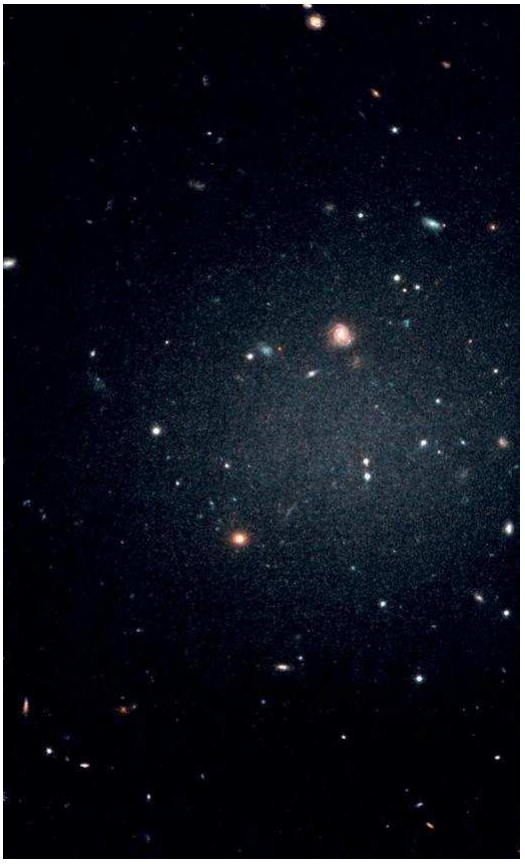
Oltre a essere esteso in Cina, il progetto potrebbe fare da modello per altri paesi, ma la cosa è discussa: non ovunque per esempio si abusa di fertilizzanti e spesso anzi il problema è l'opposto. Ma soprattutto, pochi Stati hanno i mezzi organizzativi e di persuasione del governo cinese, cruciali per concretizzare una campagna di innovazione così ampia e pervasiva.

Giovanni Sabato

ASTROFISICA

La misteriosa galassia senza materia oscura

Nessuna delle ipotesi per spiegare l'assenza di questo elemento essenziale appare convincente



La materia oscura, che costituisce l'86 per cento della massa totale dell'universo, è considerata dagli astronomi un elemento essenziale di ogni galassia: è la «colla» che le tiene insieme e ha un ruolo determinante anche nella loro formazione.

Ma un gruppo internazionale di ricercatori guidato da Pieter van Dokkum della Yale University, incrociando i dati raccolti da numerosi telescopi (tra cui il telescopio spaziale Hubble e gli osservatori Gemini e Keck alle isole Hawaii), ha fatto una scoperta sorprendente: una galassia che appare quasi completamente – se non del tutto - priva di materia oscura. Il risultato è stato pubblicato su «Nature».

La galassia, che si chiama NGC 1052-DF2 ed è distante circa 65 milioni di anni luce da noi, appartiene alla categoria delle galassie «ultra-diffuse», caratterizzate da una densità molto bassa. Per realizzare la scoperta, gli scienziati hanno analizzato il moto di dieci ammassi globulari – grandi gruppi compatti di stelle – attorno al centro della galassia, osservando che la loro velocità risultava molto più bassa di quanto previsto. Questo dato è strettamente legato alla massa totale della galassia: quanto più è alta la velocità di rotazione, infatti, maggiore è la massa. In questo caso, i calcoli dimostrano che l'intera (o quasi) massa della galassia può essere attribuita alla materia ordinaria delle sue stelle, senza necessità di ipotizzare la presenza di materia oscura.

Il risultato dimostra che la materia oscura può avere un'esistenza separata dalla materia stellare delle galassie, ma resta un rebus per i ricercatori. Una possibile ipotesi per spiegare l'inattesa osservazione è un violento evento cataclismatico che potrebbe aver giocato un ruolo nello «strappare» materia oscura a NGC 1052-DF2. Tuttavia, né questa né altre ipotesi al momento sembrano convincenti. Per avere un'idea più chiara serviranno nuove osservazioni: i ricercatori sono già al lavoro per studiare altre 23 galassie ultra-diffuse simili alla galassia già osservata.

Matteo Serra

Testare la gravità quantistica in laboratorio

Un esperimento di laboratorio per dimostrare la natura quantistica della gravità. È questa l'idea proposta indipendentemente da due gruppi di ricercatori nel Regno Unito: uno guidato da Sougato Bose, dello University College London, l'altro composto da Chiara Marletto e Vlatko Vedral, dell'Università di Oxford. Secondo i due gruppi, che hanno pubblicato le loro ricerche teoriche su «Physical Review Letters», è infatti possibile realizzare un esperimento capace di mostrare effetti quantistici sull'interazione gravitazionale fra corpi massicci microscopici, nonostante l'estrema debolezza di questa interazione rispetto alle altre interazioni fondamentali, che fino a oggi ha appunto reso impossibile evidenziarne gli effetti a livello quantistico.

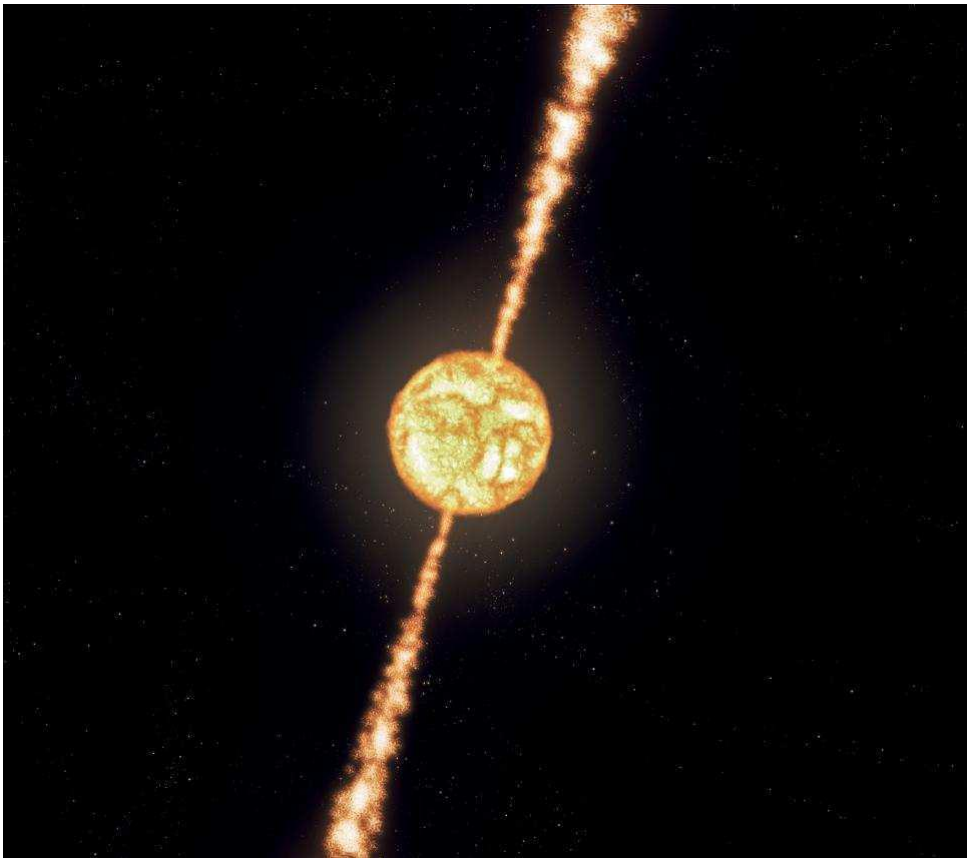
Alla base degli esperimenti c'è il fenomeno squisitamente quantistico dell'*entanglement*, ovvero della correlazione quantistica. Due sistemi microscopici opportunamente preparati possono essere infatti *entangled*, quindi strettamente correlati fra loro in modo da comportarsi come un sistema quantistico unico, indipendentemente dalla distanza reciproca: una misura effettuata su uno dei due sistemi permette di conoscere esattamente lo stato dell'altro. Secondo i due gruppi, gli esperimenti proposti dovrebbero essere in grado proprio di evidenziare l'entanglement fra due sistemi materiali microscopici creato e mantenuto esclusivamente grazie all'azione della gravità. Così, sostengono i ricercatori, si evidenzierebbe in maniera inequivocabile la natura quantistica del campo gravitazionale perché solo un campo quantistico è in grado di indurre e sostenere la correlazione fra i due sistemi microscopici. È importante sottolineare che gli esperimenti proposti non richiedono in alcun modo di rivelare l'esistenza del gravitone, la particella mediatrice del campo gravitazionale prevista da diverse teorie di gravità quantistica.

Emiliano Ricci

COSMOLOGIA

Buchi neri o gravastar?

Proposta una nuova alternativa alle possibili fasi finali della vita delle stelle di grande massa



NASA/ESA/van Dokkum (*galassia*); SPL/Getty Images (*entanglement*); 7activestudio/iStock (*stella di neutroni*)

Non solo buchi neri e stelle di neutroni: l'insieme dei possibili stadi finali nell'evoluzione delle stelle di grande massa potrebbe essere più ampio. Lo dimostra uno studio pubblicato su «Physical Review Letters» da Raúl Carballo-Rubio della Scuola internazionale superiore di studi avanzati (SISSA) di Trieste, che ha sviluppato un modello matematico che prevede l'esistenza in equilibrio di «stelle nere» e «gravastar», ossia oggetti compatti simili ai buchi neri ma privi di orizzonte degli eventi.

È ben noto agli astronomi che il destino di una stella massiccia è diventare una stella di neutroni o un buco nero. In quest'ultimo caso l'attrazione gravitazionale è così forte da non trovare più ostacoli: una volta superato un confine detto «orizzonte degli eventi», nulla può tornare indietro, nemmeno la luce.

Tuttavia, se si tiene conto di un effetto quantistico noto come «polarizzazione del vuoto» – che può produrre una forza repulsiva in grado di opporsi al collasso gravitazionale – è teoricamente possibile che una stella destinata a diventare un buco nero possa invece restare in una condizione di equilibrio, senza un orizzonte degli eventi, formando oggetti come le gravastar. Questa possibilità è studiata da tempo, ma la ricerca di Carballo-Rubio propone per la prima volta un modello consistente in cui le conseguenze della polarizzazione del vuoto appaiono significative per il destino della stella.

Dimostrare l'esistenza di questi oggetti permetterebbe di aggirare alcuni problemi teorici legati alla natura dei buchi neri, ma la questione resta aperta.

«Il modello di Carballo-Rubio è interessante, ma non spiega in che modo le soluzioni del modello possano formarsi in condizioni dinamiche, come un collasso stellare», sottolinea Paolo Pani, fisico teorico alla «Sapienza» Università di Roma. Inoltre, rimane il problema di una verifica sperimentale. «Una conferma osservativa potrebbe arrivare con gli attuali rivelatori di onde gravitazionali, in grado di catturare "echi" caratteristici di questi oggetti», suggerisce Pani.

Matteo Serra

Un fluido quantistico di fotoni

Uno dei filoni di ricerca nella fisica della materia è quello sulle transizioni di fase, cioè i cambiamenti di stato di un sistema fisico indotti dalla variazione di qualche parametro. Transizioni di fase sono, per esempio, i passaggi di stato di una sostanza al variare della temperatura. In generale, le transizioni riguardano il passaggio da una fase più ordinata a una più disordinata, o viceversa. Ora, un gruppo internazionale di ricercatori guidato da Daniele Sanvitto, dell'Istituto di nanotecnologia del Consiglio nazionale delle ricerche a Lecce, ha scoperto una particolare transizione di fase in un sistema composto da fotoni, ovvero da quanti di luce. La ricerca, descritta su «Nature Materials» con primo autore Davide Caputo, dello stesso istituto, mostra come anche un sistema di fotoni possa passare da uno stato disordinato a uno ordinato, in particolare a una fase denominata «ordine topologico». In pratica, i ricercatori hanno osservato che, in certe condizioni, la formazione spontanea di un ordine topologico, descritta per gli atomi e valsa il premio Nobel per la fisica nel 2016, si verifica anche in sistemi di fotoni. In particolare, i fotoni si comportano collettivamente in modo coerente sia dal punto di vista spaziale che temporale, come se la luce fosse diventata un liquido.

Emiliano Ricci

INFORMATICA

L'intelligenza artificiale che aiuta la chimica

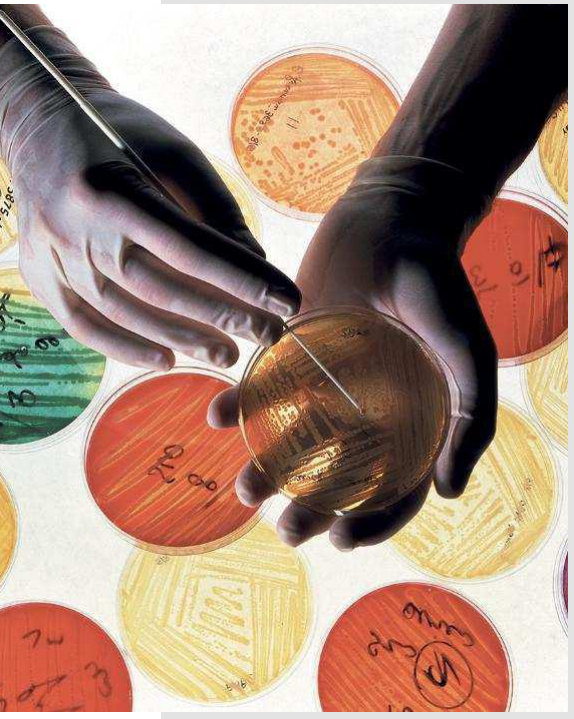
Sviluppato un sistema di IA che automatizza le complesse procedure di retrosintesi

Molti pensano che l'intelligenza artificiale (IA) sia un'invenzione recente, ma in realtà questa disciplina di studio nasce ufficialmente nel 1956, in una ormai mitica conferenza al Dartmouth College ad Hanover, negli Stati Uniti. E ha conosciuto risultati concreti fin da subito, soprattutto con lo sviluppo dei sistemi esperti, il cui primo rappresentante, Dendral, messo a punto nei primi anni sessanta dallo scienziato statunitense Joshua Lederberg, intendeva aiutare i chimici a risalire ai componenti di base di una sostanza di cui si conoscesse solo il grafico della spettrometria di massa, una misurazione tipica della chimica analitica.

Oggi l'intelligenza artificiale è andata ben oltre i sistemi esperti e si basa soprattutto su reti neurali e apprendimento automatico, o *machine learning*. La chimica però continua a giocare un ruolo chiave nel suo sviluppo. Un gruppo di ricercatori della Wilhelms Universität della Westfalia, con sede a Munster, in Germania, ha sviluppato un sistema di intelligenza artificiale in grado di completare, per certi versi, il lavoro che Dendral era già in grado di fare cinquant'anni fa. La nuova rete neurale, illustrata su «Nature», si basa sulla struttura e sui principi di funzionamento di AlphaGo, il sistema di IA che due anni fa ha sconfitto Lee Sedol, il campione sudcoreano di Go, probabilmente il più complesso gioco da scacchiera mai concepito. Il suo scopo non è giocare, ma automatizzare le procedure della retrosintesi, una delle tecniche più usate nei laboratori di ricerca in chimica, che permette di progettare la sintesi di composti chimici con un procedimento a ritroso, partendo dal prodotto che si vorrebbe ottenere.

«Anche se semplice nel concetto – spiega Marwin Segler, che ha coordinato lo studio – il processo è complesso. Proprio come in una partita di scacchi o di Go ogni passo ipotizzato dal chimico richiede di valutare un ampio spettro di possibilità». Il sistema sviluppato a Münster ha mostrato di essere efficace e di imparare via via le tecniche della retrosintesi, fornendo preziose indicazioni agli scienziati.

Riccardo Oldani



Una nuova era per gli antibiotici?

Ogni anno almeno 700.000 persone in tutto il mondo muoiono per infezioni da batteri non più controllabili dagli antibiotici a causa della resistenza batterica: una vera e propria emergenza planetaria, risultato di una selezione esasperata dovuta all'abuso di questi farmaci. Ma nella perpetua competizione tra l'evoluzione dei batteri e quella degli antibiotici, una scoperta di ricercatori della Harvard Medical School, pubblicata su «Nature», promette di cambiare lo scenario.

Da alcuni anni, il gruppo del biochimico Andrew Kruse studia RodA, una molecola che fa parte di una famiglia di proteine onnipresente nei batteri e dal ruolo poco compreso. Si riteneva infatti che RodA regolasse la forma delle cellule e i processi di divisione, poi nel 2016 Kruse ha dimostrato il coinvolgimento di questa molecola nella sintesi della parete dei batteri, la barriera protettiva che protegge esternamente la cellula batterica.

In questa nuova serie di esperimenti, i ricercatori hanno alterato la struttura di RodA in due rappresentanti dei principali gruppi strutturali di parete batterica, definiti sulla base della diversa reazione a un esame di colorazione, chiamato «colorazione di Gram»: *Escherichia coli* per i batteri Gram negativi e *Bacillus subtilis* per i Gram positivi. In entrambi, lievi variazioni della struttura della proteina provocavano la crescita incontrollata della cellula fino alla lacerazione. La caratterizzazione strutturale della proteina ha rivelato una cavità simile a una tasca che si affaccia sulla superficie esterna. «Una molecola che si leghi in questa regione provocherebbe la perdita della capacità di sintetizzare e mantenere intatta la parete batterica, innescando una cascata di reazioni che porterebbero la cellula alla morte», ha riassunto Megan Sjodt, prima autrice dello studio. Dimensioni e forma della cavità, insieme alla possibilità di accesso dall'esterno, ne fanno un bersaglio promettente per lo sviluppo di una nuova generazione di antibiotici ad ampio spettro.

Davide Michielin

Chris Ryan/Getty Images (*provette*); Geoff Tompkinson/Science Photo Library/Getty Images (*laboratorio*)

Y&R

LEGGI LE SCIENZE E MIND DIRETTAMENTE SUL PC.

SFOGLIA LE SCIENZE E MIND ONLINE.

I migliori approfondimenti su scienze, innovazione, neuroscienze e psicologia. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi le riviste comodamente a casa sul tuo pc. Inoltre su App Store è disponibile l'app di Le Scienze. Scopri tutte le offerte sul sito: http://s.lescienze.it/offerte

Le Scienze

GENETICA

Geni per cervelli innovatori

L'espressione genica di una specie di uccelli fa luce sull'evoluzione convergente dell'intelligenza

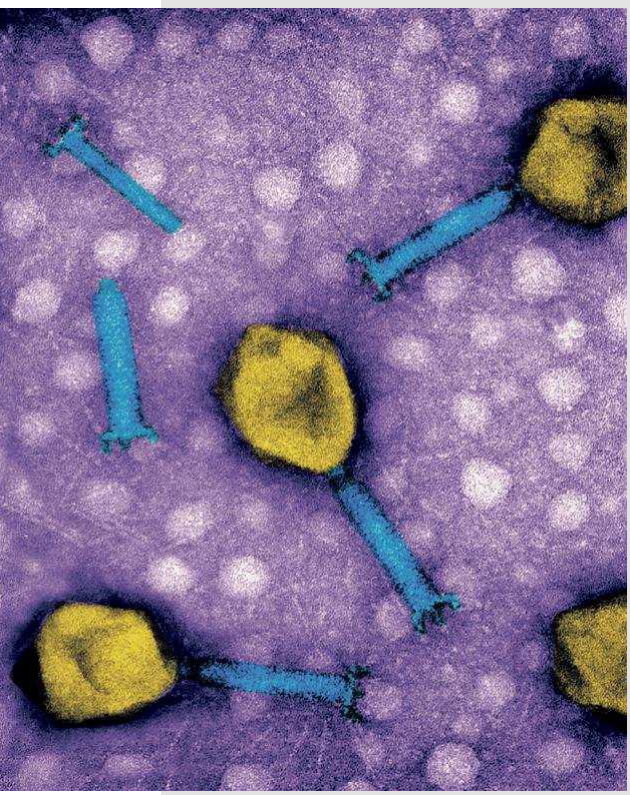
Nelle Barbados vivono due passeriformi «cugini» dal temperamento opposto: lo spavaldo ciuffolotto delle Barbados (*Loxigilla barbadensis*) e il timido piccolo cantore di Cuba (*Tiaris bicolor*). Nonostante habitat e comportamenti territoriali simili, quando si tratta di procacciarsi il cibo i ciuffolotti si inventano sempre qualcosa di nuovo (per esempio, hanno imparato ad aprire bustine di zucchero) mentre i cantori hanno strategie fisse. L'innovazione, intesa come capacità di risolvere problemi mai incontrati, è una forma di intelligenza e visto che negli uccelli nessuno aveva studiato questo tratto cognitivo a livello neuronale, lo ha fatto un gruppo di ricerca coordinato da Jean-Nicolas Audet della canadese McGill University.

Su «Science Advances» i ricercatori scrivono che i ciuffolotti, rispetto ai cantori, hanno un cervello più plastico in un'area legata alla capacità di risoluzione dei problemi. Il gruppo ha catturato esemplari selvatici delle due specie per valutarne le abilità in test di distinzione di stimoli (scegliere tra due diversi contenitori, solo uno con cibo accessibile) e *problem solving* (sollevare un coperchio per prendere semi). Nella distinzione tutti gli uccelli hanno fatto bene, ma solo i ciuffolotti hanno sollevato i coperchi, la prova che a identificare le specie è l'abilità nel risolvere nuovi problemi. L'analisi dell'espressione genica dei neuroni del pallio, l'equivalente della corteccia prefrontale dei mammiferi dove si trovano le capacità di innovazione, ha rivelato che nei ciuffolotti sono iper-espressi i geni che sintetizzano i recettori per il glutammato, neurotrasmettitore che promuove plasticità sinaptica e quindi capacità di apprendimento.

«Se confermeremo i risultati, avremo prova dell'evoluzione convergente dell'intelligenza, che coinvolge gli stessi recettori nonostante le differenze nell'organizzazione cerebrale di uccelli e mammiferi», ha detto Audet.

Martina Saporiti

Un nuovo meccanismo evolutivo



«L'evoluzione è più astuta di te», amava dire il biochimico britannico Leslie Orgel. E Katherine Petrie, biologa all'Università della California a San Diego, ha svelato su «Science» una nuova astuzia: un altro meccanismo per generare la variazione dei caratteri su cui poi agisce la selezione.

Anni fa, Petrie aveva messo in competizione il fago lambda – un virus che infetta i batteri – con *Escherichia coli*. Il fago infetta l'ospite legandosi, con una propria proteina, a uno specifico recettore sulla superficie del batterio. Coltivando insieme batteri e virus, Petrie aveva osservato che in poche settimane *E. coli* riduce il numero dei suoi recettori, diventando meno sensibile all'infezione. Presto però il virus impara a entrare nel batterio usando un recettore diverso.

La cosa sorprendente è che il virus riconosceva il nuovo recettore sempre con la stessa proteina, che restava capace di legarsi al recettore vecchio ma imparava ad attaccare anche il nuovo. Spesso le nuove funzioni emergono quando un gene si duplica, e una delle due copie muta e assume una funzione nuova, perdendo la vecchia. Ma qui evidentemente accadeva qualcosa di diverso.

Grazie a nuovi esperimenti, Petrie ha ora scoperto che, con poche mutazioni, il gene che codifica per la proteina del virus produce una proteina instabile, che a volte assume la struttura tridimensionale classica e quindi riconosce il recettore originario, e a volte riconosce una struttura diversa, che riconosce il recettore nuovo.

L'esito è casuale e le due forme si producono circa in pari quantità. Ogni virus ha solo una delle due forme; tuttavia, poiché il gene che codifica le informazioni per sintetizzarle entrambe è lo stesso, la sua progenie avrà per metà la versione vecchia e per metà la nuova. È quindi una variazione non ereditaria, che permette un adattamento rapido. Se poi questi virus sono coltivati con batteri che hanno solo il nuovo recettore, acquisiscono presto ulteriori mutazioni che stabilizzano la proteina nella nuova forma. «Se le proteine instabili fossero una fonte di variazione evolutiva era dibattuto. Noi lo abbiamo visto in diretta. Ora vogliamo capire quanto la cosa sia generalizzabile», ha concluso Petrie.

Giovanni Sabato

MB Photographic/Shutterstock (*ciuffolotto delle Barbados*); Dennis Kunkel Microscopy/SPL/AGF (*virus batteriofago*)

CLIMA

Dove e quando piove nelle grandi città

Ricostruita una climatologia della pioggia per varie aree di Barcellona tra il 1994 e il 2009

Nelle grandi città capita di constatare che a volte piove a casa nostra ma non in altre zone, o viceversa. In effetti le precipitazioni sono spesso localizzate, o assumono carattere o violenza diversa da zona a zona, anche molto vicine, a seconda della provenienza dell'aria o delle caratteristiche del suolo.

In un regime di riscaldamento futuro nell'area del Mediterraneo, in cui gli eventi di pioggia saranno forse meno frequenti ma sicuramente più intensi e violenti, le città devono prepararsi a questi fenomeni. Le autorità locali devono sapere quali sono le zone più vulnerabili della città, ma sarebbe importante avere informazioni anche su quali zone siano più soggette ai fattori meteorologici esterni, per esempio piogge violente. Avere a disposizione una rete di pluviometri in città potrebbe essere un importante ausilio.

In un articolo su «Theoretical and Applied Climatology», Xavier Lana, dell' Universitat Politècnica de Catalunya a Barcellona, e collaboratori hanno mostrato che cosa si può fare con una rete di osservazioni del genere. Disponendo di 23 pluviometri ad alta risoluzione temporale (una misura ogni cinque minuti), i ricercatori hanno costruito una «climatologia della pioggia» tra il 1994 e il 2009 per varie aree di Barcellona e hanno previsto i tempi di ritorno delle precipitazioni più intense zona per zona.

Oggi questi tempi di ritorno sono calcolati nell'ipotesi di stazionarietà, cioè presupponendo che non cambino le condizioni di piovosità, ma occorrerà adottare modelli previsionali che diano proiezioni del clima locale futuro per avere un quadro più preciso. In ogni caso, l'esempio di Barcellona può aprire la strada a reti osservative distribuite anche in altre città, consentendo alle autorità municipali di avere informazioni su entrambi i fattori che determinano il rischio idrico: le forzanti meteorologiche esterne e la vulnerabilità del territorio delle varie aree.

Antonello Pasini

jacquesvandinteren/iStock

RENATO BRUNI
LE PIANTE SON BRUTTE BESTIE

224 pagine
Euro 18,00

DAVVERO LE PIANTE POSSONO CAMBIARE SESSO?

PERCHÉ È IMPOSSIBILE STACCARE L'EDERA DAI MURI?

PERSE TRA SMOG E PALAZZI, COME FANNO LE API A TROVARE I FIORI SUI NOSTRI BALCONI?

Le storie meno battute e le spiegazioni meno ovvie di un anno di giardinaggio spuntano tra gli orti, i giardini e i balconi fioriti, coniugando il pollice verde e la scienza.

codice EDIZIONI

info@codiceedizioni.it
codiceedizioni.it
facebook.com/codiceedizioni
twitter.com/codice_codice
instagram.com/codice_codice

Alieni vegetali in Italia

Fra le 8195 specie vegetali autoctone italiane si sono infiltrate 1597 specie aliene, di cui 221 invasive che causano danni a ecosistemi, agricoltura e salute. Lo rivela un censimento delle piante aliene d'Italia pubblicato su «Plant Biosystems», che indica come il nostro paese sia il più invaso d'Europa.

«A favorire le specie invasive è la mancanza di parassiti e predatori, la grande produzione di semi e, talvolta, anche "armi chimiche": l'albero di origine cinese ailanto, per esempio, libera dalle radici sostanze che inibiscono la crescita di altri alberi», ricorda uno degli autori, il botanico Gabriele Galasso del Museo di storia naturale di Milano. Un aiuto arriva anche da degrado del suolo per disboscamenti, incendi, cementificazione e pratiche agricole sbagliate. Se al nord danno problemi, fra le altre, la nord-americana ambrosia, dal polline molto allergenico, e il poligono del Giappone, che ricopre gli argini, al centro-sud si diffondono l'amazzonico giacinto d'acqua, che soffoca i bacini idrici, e la sudafricana acetosella gialla, che rende velenoso il foraggio.

«L'arrivo di specie aliene è stato accelerato dal commercio globale e per frenarlo si dovrebbero controllare le importazioni e attuare quarantene sulle piante da vivaio», chiosa Galasso. (AlSa)

Una nuova mappa della materia oscura

Nonostante la sua natura sia sconosciuta, la studio della sua distribuzione nell'universo non ha soste. Stiamo parlando della materia oscura, di cui è stata appena pubblicata la mappa più estesa e dettagliata di sempre. Autori di questo studio, presentato in due articoli pubblicati su «Publications of the Astronomical Society of Japan», sono due gruppi di ricerca guidati rispettivamente da Satoshi Miyazaki, del National Astronomical Observatory of Japan a Tokyo, e da Masamune Oguri, dell'Università di Tokyo.

Il lavoro, realizzato grazie all'impiego della fotocamera Hyper Suprime-Cam – il cui sensore CCD da 870 megapixel copre 1,5 gradi di campo di vista – montata sul telescopio Subaru, alle Hawaii, ha permesso di ricostruire la distribuzione 3D della materia oscura attraverso lo studio dell'effetto di lente gravitazionale prodotto da questa materia sulla luce proveniente da galassie di sfondo, che per questo motivo risultano deformate. Sebbene l'elaborazione sia ancora incompleta, i dati parziali mostrano un numero di aloni galattici inferiore rispetto alle previsioni dei modelli teorici. L'alone è uno degli indicatori del tasso di crescita di una galassia, che a sua volta dipende dal tasso di espansione dell'universo. Il risultato potrebbe quindi indicare la necessità di rivedere i modelli teorici. (EmRi)

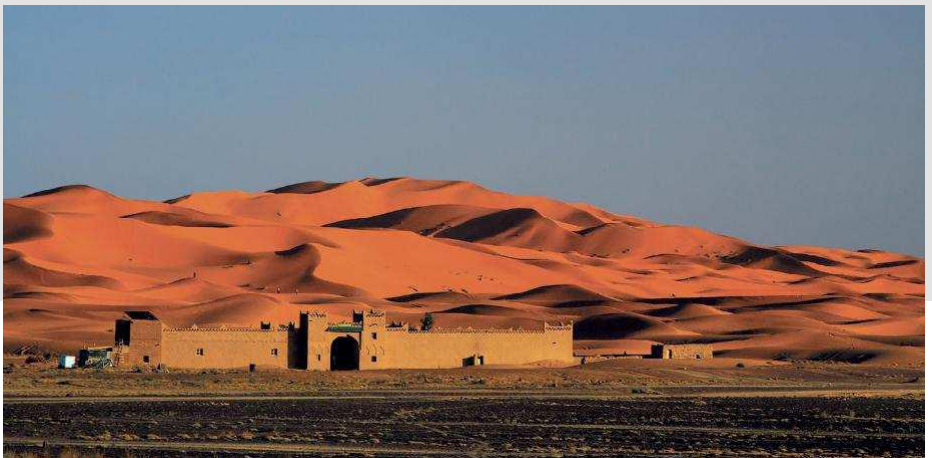
Più anziani, più insonni

Con l'avanzare dell'età si dorme di meno. Perché? Uno studio pubblicato su «Neurobiology of Aging» suggerisce che l'insonnia negli anziani dipende da un cattivo funzionamento del nucleo soprachiasmatico. Quest'area del cervello registra la quantità di luce a cui è esposto l'organismo e in base a questa resetta i cicli circadiani, cioè l'alternarsi quotidiano di sonno e veglia.

Il «guasto», sostengono gli autori dello studio coordinati da Gurprit S. Lall dell'Università del Kent, è in uno specifico recettore per il neurotrasmettitore glutammato attivo in questo nucleo. Via via che si invecchia una subunità della molecola che costituisce il recettore diventa meno efficiente e il nucleo cerebrale non è più in grado di rilevare correttamente la luce, da qui l'alterazione del sonno. L'osservazione è utile per migliorare i trattamenti, a livello fisiologico e comportamentale per questo tipo di insonnia, che spesso ha un impatto negativo sul benessere degli anziani. (FeSg)

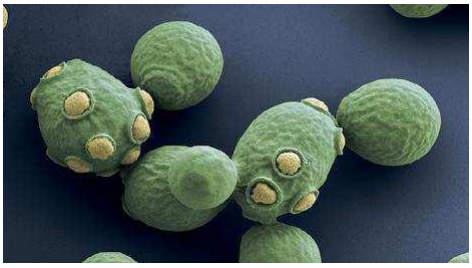
L'avanzata del Sahara negli ultimi cent'anni

Il Sahara, il deserto più grande del mondo, continua ad allargarsi. Lo dimostrano sul «Journal of Climate» Natalie Thomas e Sumant Nigam, i primi ad aver studiato l'estensione dei confini del Sahara in un arco di tempo lungo cent'anni. I ricercatori dell'Università del Maryland hanno analizzato il tasso di pioggia caduta sul continente africano dal 1902 a oggi, notando che l'andamento delle precipitazioni era diminuito nettamente soprattutto nelle aree fluviali a sud del Sahara, cioè il delta del Niger e il bacino del Congo. Considerato anche l'aumento delle temperature nelle regioni a nord, lungo i confini settentrionali del deserto, i ricercatori hanno interpretato questo dato come la prova che la superficie desertica si era allargata del dieci per cento dall'inizio del secolo scorso. L'espansione del Sahara, ipotizzano i due scienziati, sarebbe a sua volta il segnale di altri importanti fenomeni climatici che da tempo interessano l'Africa, come l'allargamento della fascia tropicale e la variabilità ciclica della temperatura sugli oceani, che abbassano il tasso di precipitazioni durante la stagione estiva. Tuttavia, solo i due terzi dell'espansione del Sahara sarebbero riconducibili a cause di origine naturale. Il resto, concludono i ricercatori, dipende dalle attività umane. (SaMo)



JoaquimFP/iStock (*acetosella gialla*); monkeybusinessimages/iStock (*insonnia*); thumb/iStock (*Sahara*)

Luce per il lievito



L'optogenetica, che permette di controllare con fasci di luce cellule nervose geneticamente modificate, è una delle tecniche di indagine biologica con più alto potenziale di sviluppo. Ora, per la prima volta, José Avalos della Princeton University e colleghi hanno impiegato questo metodo per regolare il metabolismo cellulare di un lievito per incrementare la produzione di sostanze chimiche di valore commerciale.

Gli esperimenti, descritti su «Nature», hanno interessato *Saccharomyces cerevisiae* e la sua capacità di sintetizzare isobutanolo, alcool impiegato nei lubrificanti e nelle benzine. Introducendo nel DNA del lievito un gene di un batterio reattivo alla luce è stato possibile controllarne l'attività enzimatica responsabile della produzione di isobutanolo. Al di là dell'importanza della scoperta in ambito industriale (i lieviti hanno aumentato di cinque volte la loro capacità produttiva), la ricerca apre la strada all'impiego dell'optogenetica in scenari sempre più vasti. (MaSe)

La guerra civile degli scimpanzé

Fra il 1970 e il 1974, l'etologa Jane Goodall osservò nel Parco nazionale del Gombe Stream in Tanzania la «prima guerra civile fra scimpanzé»: un gruppo si era diviso in due fazioni, Kasakela e Kahama, e quest'ultima finì per soccombere. Oggi gli appunti di Goodall sono stati analizzati da Joseph Feldblum della Duke University, che, mappando i rapporti fra 19 esemplari del gruppo, ha ricostruito gli avvenimenti sull'«American Journal of Physical Anthropology». Il *casus belli* sarebbe stato la competizione fra maschi innescata dalla scarsità di femmine fertili, accresciuta poi, forse, anche dalle banane lasciate dai ricercatori per attirare gli animali. Dai conflitti emersero Humphrey, leader di Kasakela, che occupò con i suoi alleati l'area nord del parco, mentre Charlie e Hug, leader di Kahama, occuparono con i seguaci quella sud. Per due anni le «fazioni» si limitarono a minacciarsi, mantenendo anche qualche rapporto amichevole. Ma poi la separazione si radicalizzò e gli incontri si fecero tanto violenti da provocare la morte dei maschi adulti di Kahama: scomparsi loro, la fazione fu riassorbita da Kasakela.

È un conflitto da scarsità di risorse già osservato in società umane. Vederlo fra gli scimpanzé fa pensare si tratti di dinamiche radicate nell'albero evolutivo dei primati, dice Feldblum. (AlSa)

L'Etna sta scivolando verso il mare

Saldo come una montagna: pare che il detto non si adatti alla «muntagna» per antonomasia, l'Etna, che sta invece rapidamente, in termini geologici, finendo in mare. Lo ha scoperto il vulcanologo John Murray, della The Open University a Milton Keynes, nel Regno Unito, che sul «Bulletin of Volcanology» ha pubblicato l'analisi di 11 anni di dati provenienti dalle oltre 100 stazioni GPS poste sui fianchi del vulcano siciliano.

È risultato che l'Etna sta ruotando su se stesso e scivolando su un piano inclinato di circa 2 gradi verso il mare, in direzione di Giarre, una cittadina fra Catania e Taormina, alla velocità di 14 millimetri all'anno. Essendo Giarre lontano 15 chilometri dall'Etna, il pericolo non è certo imminente, tuttavia, avverte Murray, il movimento va tenuto d'occhio.

«In vulcani antichi lo spostamento della massa della montagna verso il mare ha provocato frane lungo la costa, innescando tsunami. Inoltre questo movimento va considerato negli studi di previsione delle prossime eruzioni», ha spiegato Murray

E la «corsa» dell'Etna verso il mare potrebbe anche accelerare, perché lubrificata dallo strato di sedimenti sciolti su cui si è accumulato, in 570.000 anni di eruzioni, il suo cono di lava e ceneri di 3329 metri.

«Se in un arco di dieci anni si dovesse registrare un rallentamento nello spostamento, allora forse ci potremo tranquillizzare, ma se in quel periodo la velocità dovesse raddoppiare, comincerei a preoccuparmi», ha concluso Murray. (AlSa)

Segnali radio dalle prime stelle

Le prime stelle si sono accese 180 milioni di anni dopo il big bang. Ad affermarlo su «Nature» è un gruppo guidato da Judd Bowman, dell'Arizona State University a Tempe, che ha individuato una distorsione spettrale nella radiazione cosmica di fondo alla frequenza di 78 megahertz. I modelli teorici prevedono che la luce delle prime stelle alteri lo stato eccitato dell'idrogeno neutro corrispondente alla riga di 21 centimetri, e che, a causa di questa alterazione, si abbia un diverso assorbimento dei fotoni del fondo cosmico. Dalla

frequenza a cui si osserva questa alterazione si può dedurre quando si sono accese le prime stelle. Ebbene, i 78 megahertz indicano che il momento in cui l'universo uscì dall'«epoca oscura» arrivò oltre 13,5 miliardi di anni fa.

Non solo. La distorsione osservata appare più intensa del previsto. Questo fatto può essere giustificato in vari modi, uno dei quali invoca la materia oscura. Nello stesso numero di «Nature», Rennan Barkana, dell'Università di Tel Aviv, ipotizza che sia proprio l'interazione di questa con la materia ordinaria a spiegare le osservazioni. I dati permettono anche di stimare la massa delle particelle di materia oscura, pari ad alcune volte la massa del protone, quindi molto più leggera delle WIMP. (EmRi)

Cortesia M. Kornmesser/ESO (*stella*); alle12/iStock (*Etna*)

Questo pianeta di fantasia in orbita attorno a una nana rossa ha una propria luna. Entrambi gli oggetti celesti sono immersi nella calda luce della stella e dei suoi brillamenti.

PLANETOLOGIA

Ombre di

Due nuovi telescopi spaziali dovrebbero rivelare una miriade di nuovi esopianeti

di Joshua N. Winn

Illustrazioni di Ron Miller

altri mondi

IN BREVE

Il satellite per la caccia ai pianeti più prolifico al mondo, Kepler della NASA, sta per terminare la sua missione, ma quest'anno dovrebbero essere lanciate nuove missioni che hanno come obiettivo gli esopianeti.

Il Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) della NASA e il Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS) dell'Agenzia spaziale europea cercheranno tracce di altri mondi che transitano davanti alle rispettive stelle.

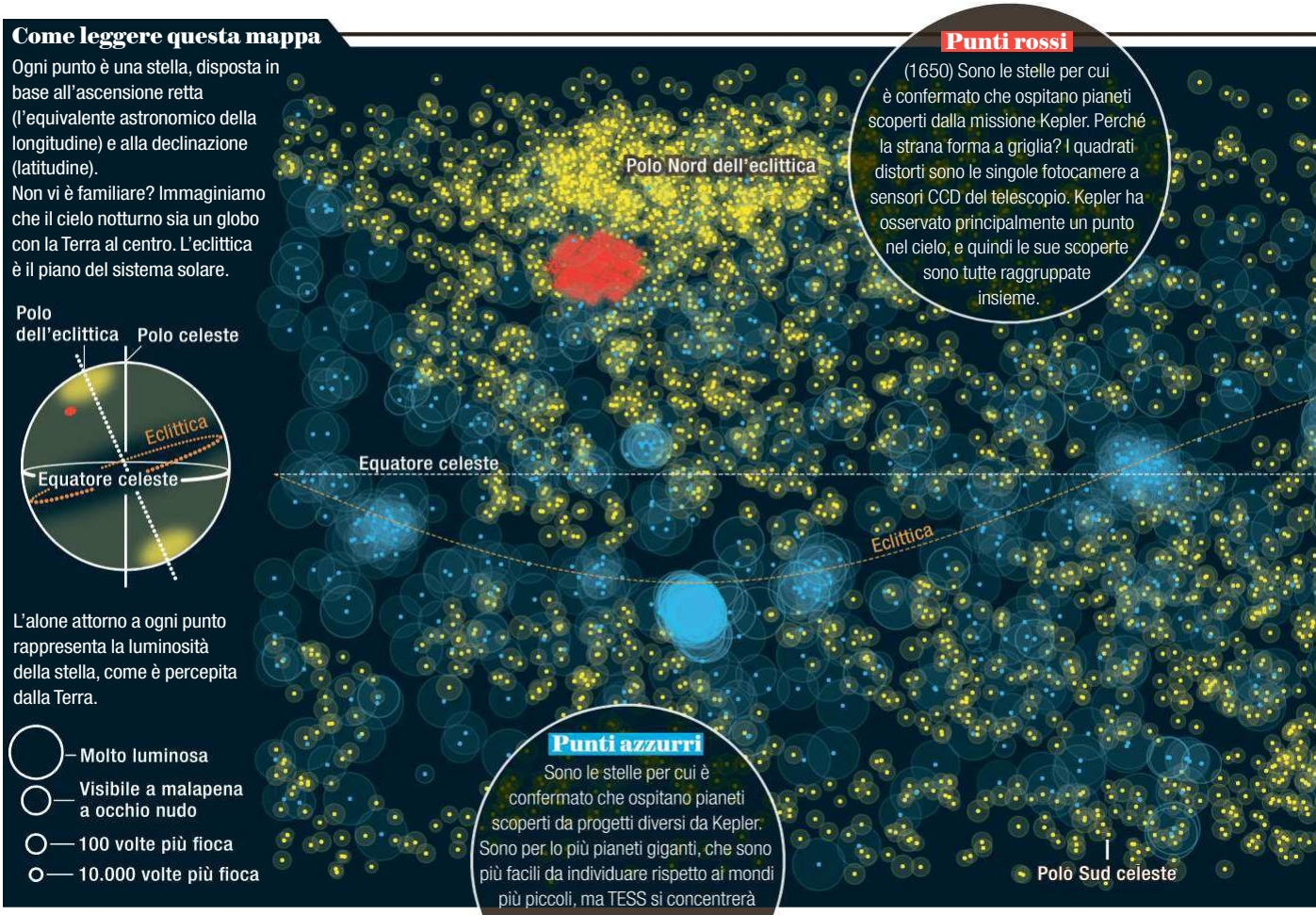
Stiamo per aggiungere molti altri pianeti extrasolari al conteggio crescente, e questo dovrebbe portarci più vicino alla risposta a due domande: ci sono altri mondi abitabili nello spazio? C'è vita nell'universo al di fuori della Terra?

Joshua N. Winn è un astrofisico della Princeton University che studia come si formano e si evolvono i pianeti extrasolari. Ha partecipato alla squadra Kepler della NASA ed è un ricercatore del Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS).

La mattina del 21 agosto 2017, in un campo erboso a Midvale, nell'Idaho, io e la mia famiglia trepidavamo nell'attesa. Di lì a pochi minuti saremmo stati avvolti dall'ombra della Luna. Insieme a milioni di altre persone che avevano raggiunto una stretta striscia di Terra che si estendeva dall'Oregon al South Carolina, stavamo per vedere un'eclissi totale di Sole.

In seguito mi sono chiesto quanti giovani futuri astronomi fossero apparsi in quel momento, affascinati dall'insolito crepuscolo diurno e dalla rara visione della corona incandescente del Sole. Le eclissi sono state fonte di ispirazione e di conoscenza per secoli e lo sono tuttora. La mia ricerca non si basa sulle eclissi solari ma su un tipo diverso di eclissi: i «transiti» dei pianeti extrasolari. I telescopi non riescono a vedere la sagoma di un pianeta mentre passa davanti alla propria stella quando quella stella è lontana anni luce, tuttavia il lieve calo di luminosità che si verifica nel momento in cui un pianeta intercetta una piccola parte della luce stellare è sufficiente per dirci che c'è un mondo alieno.

Gli astronomi hanno individuato il primo transito esoplanetario nel 1999. Dopo una decina d'anni il conteggio aveva superato quota 100, e ora arriviamo a quasi 4000 transiti di pianeti extrasolari, grazie soprattutto alla missione Kepler della NASA, che dovrebbe concludersi quest'anno. Sebbene oggi il metodo del tran-



Infografica di Jan Willem Tulp

sito sia quello più efficace che abbiamo per trovare mondi lontani, con altre tecniche di rilevazione sono stati scoperti oltre 700 esopianeti. Nel complesso, abbiamo trovato una grande eterogeneità di mondi, non prevista dalle teorie sulla formazione planetaria, e sospettiamo che stiamo sfiorando la superficie di un vasto oceano.

Per quest'anno sia la NASA sia l'Agenzia spaziale europea (ESA) hanno in programma il lancio di nuovi telescopi dedicati ai transiti dei pianeti. Nel frattempo, moderni telescopi in osservatori su vette montane stanno ampliando la ricerca a tipi di stelle che le missioni spaziali non esploreranno. E tutto questo non farà altro che stuzzicare l'appetito in vista del veicolo spaziale definitivo per rilevare le eclissi, che l'ESA intende lanciare nel 2026.

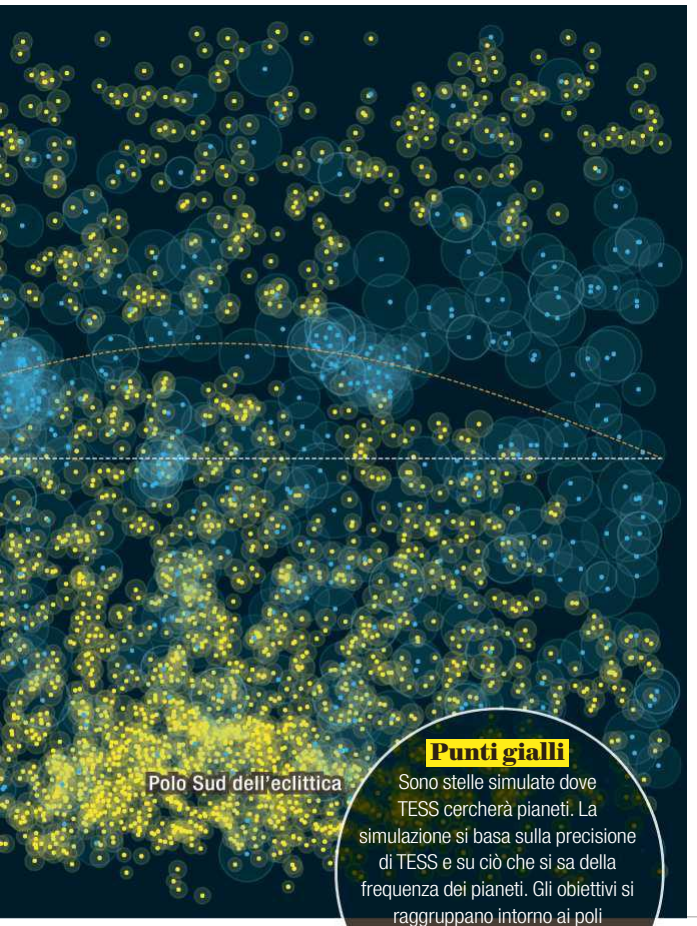
La situazione finora

Buona parte di ciò che sappiamo sugli esopianeti viene da Kepler. Dopo il lancio, nel 2009, il telescopio ha orbitato attorno al Sole e ha osservato senza sosta un tratto di cielo corrispondente alle costellazioni del Cigno e della Lira, monitorando la luminosità di circa 150.000 stelle. Nel 2013 il telescopio ha cominciato a seguire un piano modificato, in seguito al guasto di due delle sue ruote di reazione, che mantengono l'osservatorio puntato nella direzione giusta, ma ha continuato a scoprire pianeti.

Tutto ciò nonostante il fatto che le eclissi siano rare. Kepler ha trovato prove di eclissi planetarie solo in una piccola percentuale delle stelle esaminate, sotto forma di brevi diminuzioni periodiche della luminosità. Ogni sequenza di cali di luminosità rivela l'esistenza di un pianeta la cui orbita è per caso allineata quasi perfettamente con la nostra visuale, provocando una minuscola eclissi parziale ogni volta che passa. La frazione di luce mancante ci dà informazioni sull'area della sagoma del pianeta relativamente alla sezione trasversale della stella. Quindi i corpi più grandi sono molto più facili da rilevare: visto da lontano, per esempio, Giove che transita davanti al Sole provocherebbe un calo di luminosità dell'1 per cento, mentre il calo dovuto a un'eclissi provocata dalla Terra sarebbe solo dello 0,01 per cento. Nessuno ha trovato il modo di misurare un segnale così piccolo con un telescopio sulla superficie terrestre; la nostra atmosfera altera troppo la luce delle stelle. Servono quindi telescopi spaziali.

Kepler ha scovato quasi 5000 possibili pianeti, di cui oltre 3500 sono già stati confermati, tramite analisi successive, come pianeti reali. La maggior parte dei pianeti di Kepler rientra in due categorie: quelli di dimensioni circa terrestri o poco più grandi («super-Terre») e quelli un po' più piccoli del nostro ottavo pianeta («mini-Nettuno»). Per la maggior parte dei sistemi planetari trovati da Kepler conosciamo un solo pianeta, ma ci sono centinaia di sistemi con vari pianeti e uno scoperto di recente ne ha addirittura otto, proprio come il sistema solare. Questi numeri sono dovuti sia alle distorsioni osservative proprie di Kepler – il fatto che può individuare più facilmente pianeti più grandi che orbitano più vicini alle loro stelle – che alla situazione generale dei pianeti.

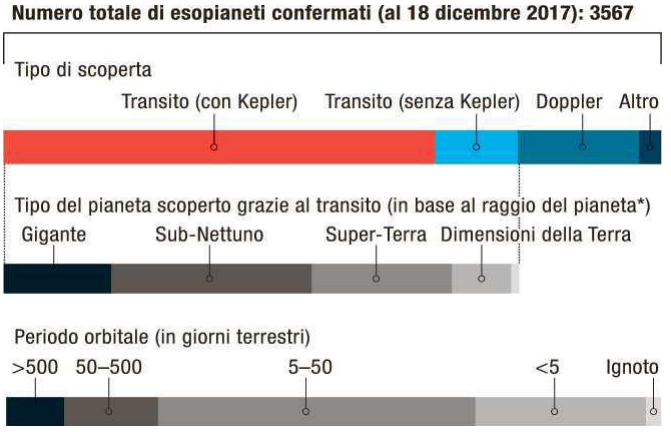
Alcune osservazioni di Kepler sono sorprendenti. A mio avviso la scoperta più incredibile è l'esistenza di sistemi solari in miniatu-



Punti gialli
Sono stelle simulate dove TESS cercherà pianeti. La simulazione si basa sulla precisione di TESS e su ciò che si sa della frequenza dei pianeti. Gli obiettivi si raggruppano intorno ai poli dell'eclittica perché sono aree del cielo in cui TESS raccoglierà più dati.

Censimento planetario

La scienza degli esopianeti ha iniziato a svilupparsi a metà degli anni novanta; da allora gli astronauti hanno compilato un catalogo che ormai comprende più di 3500 pianeti in orbita attorno a stelle diverse dal Sole, che però sono appena una piccola parte dei pianeti che probabilmente esistono nella galassia. Finora la maggior parte delle scoperte è arrivata dal telescopio Kepler della NASA, che presto terminerà la sua missione. Il suo posto sarà preso da due nuovi osservatori spaziali, il Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), della NASA, e il Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS), dell'Agenzia spaziale europea; per TESS il lancio è previsto tra aprile e giugno 2018, per CHEOPS a fine 2018, inizio 2019.



** Mostriamo le categorie planetarie adottate dalla missione TESS, che però sono arbitrarie, e altri gruppi usano definizioni diverse per ogni tipo di pianeta.*

ra. Possono avere anche sei pianeti attorno a una stella, con orbite anche più piccole di quella di Mercurio attorno al Sole. Quello che li rende così importanti è che sono comuni. Se scegliamo a caso una stella simile al Sole nel cielo notturno, c'è una probabilità del 50 per cento che abbia almeno un pianeta più grande della Terra con un'orbita più ravvicinata di Mercurio. Nessuno aveva previsto che pianeti così fossero comuni; anzi, alcune teorie più dettagliate avevano previsto che fossero rari. Manca qualcosa di fondamentale nella teoria standard sulla formazione dei pianeti.

Kepler ha scoperto anche alcuni pianeti rari e bizzarri che effettivamente erano stati previsti, ma dagli autori di fantascienza. Uno dei miei preferiti è KOI 1843.03, di dimensioni simili alla Terra, così vicino alla propria stella che il suo lato illuminato deve trovarsi a migliaia di gradi. Probabilmente la superficie è coperta da oceani di magma, non troppo diversi dall'immaginario pianeta Mustafar del mondo di *Star Wars*, su cui avviene il drammatico duello fra Obi-Wan e Anakin. L'orbita di KOI 1843.03 è talmente piccola che impiega appena 4,25 ore per compiere una rivoluzione completa, più o meno il tempo che serve per guardare *Star Wars: Episodio III* con i contenuti extra. Kepler-16b, dal canto suo, somiglia al pianeta natale di Luke Skywalker, Tatooine: ha due Soli in cielo, perché orbita a attorno a una coppia di stelle binarie che a loro volta sono ognuna in orbita attorno all'altra.

C'è poi Kepler-36, dove due pianeti condividono praticamente la stessa orbita, il che li fa interagire in modo caotico. Se anche conoscessimo le attuali posizioni dei pianeti con una precisione di un metro, non riusciremmo a prevederne le posizioni tra qualche decennio: è una versione planetaria dell'«effetto farfalla». Qui sulla Terra la rivoluzione scientifica è iniziata con la comprensione del moto dei pianeti. Pensiamo quanto sarebbe difficile per uno scienziato del sistema Kepler-36.

In origine Kepler era stato progettato per rispondere alla vecchia domanda su quanto siano comuni o rari i pianeti di tipo terrestre. Con questo termine la maggior parte degli astronomi indica pianeti di dimensioni e massa simili a quelli della Terra su cui sia plausibile trovare oceani di acqua liquida. Un pianeta del genere deve trovarsi nella zona in cui il calore della sua stella sia abbastanza intenso da liquefare l'acqua ghiacciata ma non da vaporizzarla. Gli scienziati chiamano questo intervallo di distanze «zona abitabile», perché ritengono che l'acqua liquida sia stata essenziale per far apparire la vita sulla Terra, e forse questo vale anche altrove.

Kepler ha scoperto pianeti rari e bizzarri che erano già stati previsti, ma dalla fantascienza

Kepler ha trovato una dozzina di pianeti potenzialmente rocciosi nella zona abitabile, portandoci vicino alla risposta a quella domanda. Ora per calcolare la percentuale di stelle con pianeti di tipo terrestre non dobbiamo fare altro che dividere per il numero di stelle osservate da Kepler, giusto? Sembra semplice. In concreto, questo calcolo è assai complesso. Non è chiaro quante fra le stelle analizzate da Kepler fossero piccole, luminose e sufficientemente stabili affinché il telescopio potesse rilevarvi pianeti di tipo terrestre in orbita. Calcolarlo richiederà circa un altro anno, per esaminare i dati e stabilire le proprietà delle stelle.

Una finestra più grande

Per quanto amiamo Kepler, la missione ha avuto un grosso limite. Il telescopio puntava principalmente in una direzione e osservava solo 1/400 del cielo. Di conseguenza Kepler doveva guardare molto lontano in quella direzione per rilevare un campione di stelle abbastanza grande da rendere utile il sondaggio. La tipica stella di Kepler è a migliaia di anni luce di distanza.

Ora, come qualsiasi astronomo, mi piace sbalordire il pubblico parlando di oggetti lontanissimi, a milioni di miliardi di chilometri di distanza. Ma, da un punto di vista pratico, lontano è male. Le stelle distanti sono fioche e inviano ai nostri telescopi solo un rigagnolo di fotoni. Questa scarsa luminosità limita la precisione dei nostri dati e rende impossibili alcune misurazioni; per esempio non possiamo misurare la massa della maggior parte dei pianeti di Kepler. Il segnale del transito ci dice il diametro di un pianeta ma non la sua massa, e questa lacuna ci lascia in dubbio sul tipo di pianeta con cui abbiamo a che fare. È denso e roccioso, come la Terra? È diffuso e gassoso, come Giove e Saturno? O una via di mezzo? Possiamo rispondere solo conoscendo diametro e massa.

Il modo usuale per determinare la massa di un pianeta consiste nel misurare l'accelerazione della stella in risposta all'attrazione gravitazionale del pianeta: più grande è la massa, più la stella viene spostata. Rileviamo il movimento della stella usando l'effetto Doppler, la lieve variazione nella lunghezza d'onda della luce della stella provocata dal suo movimento quando si avvicina o si allontana da noi. (Con questo metodo a volte riusciamo a scoprire pianeti precedentemente sconosciuti perché possiamo individuare l'oscillazione di una stella anche se il pianeta non la eclissa.) Questa tecnica richiede la spettroscopia ad alta risoluzione: dobbiamo dividere la luce stellare nel suo spettro e misurare l'intensità di almeno 50.000 lunghezze d'onda diverse. Per le stelle fioche, però, non c'è abbastanza luce da studiare in questo modo.

La missione Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) della NASA, del cui gruppo di ricerca faccio parte, punta a risolvere questo problema. A bordo ci saranno quattro telescopi, ciascuno di dieci centimetri di diametro, appena un decimo delle dimensioni del telescopio Kepler. Questa configurazione potrebbe sembrare strana: in genere si progredisce verso telescopi più grandi, non più piccoli. Ma il vantaggio di un telescopio più piccolo è un campo visivo più ampio; questa relazione tra capacità di raccolta e campo visivo è insita nelle leggi fondamentali dell'ottica. Ogni telecamera TESS vede un settore di cielo ampio quasi sei volte quello di Kepler, e inoltre TESS ruoterà per scrutare in diverse direzioni. In definitiva, TESS dovrebbe poter osservare molte, molte più stelle luminose rispetto a quelle poche capitate nel piccolo campo visivo di Kepler.

Il lancio di TESS è previsto tra aprile e giugno di quest'anno. Per i due anni successivi TESS analizzerà circa il 90 per cento del cielo, dividendolo in 26 settori parzialmente sovrapposti e monitorando ciascun settore per circa un mese. Come Kepler, ci aspettiamo che anche TESS scoprirà migliaia di pianeti, ma saranno in orbita attorno a stelle tipicamente 30 volte più luminose. Questa luminosità sarà un vantaggio quando useremo telescopi a terra per approfondire le scoperte di TESS: sembrerà che il potere di raccolta di luce di questi telescopi sia stato incrementato di un fattore di 30 rispetto a quello che potevano fare con le scoperte di Kepler.

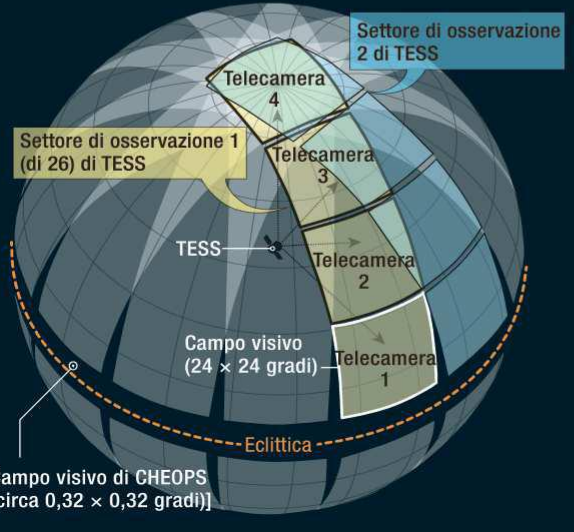
E dopo TESS c'è il Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS) dell'Agenzia spaziale europea (ESA), programmato per fine 2018, inizio 2019. CHEOPS ha un unico telescopio con un diametro di 32 centimetri che verrà usato per una missione diversa e complementare. TESS esplorerà ampie aree del cielo in modo metodico e predeterminato, CHEOPS inquadrerà singole stelle per cui c'è già qualche prova dell'esistenza di un pianeta e raccoglierà dati migliori.

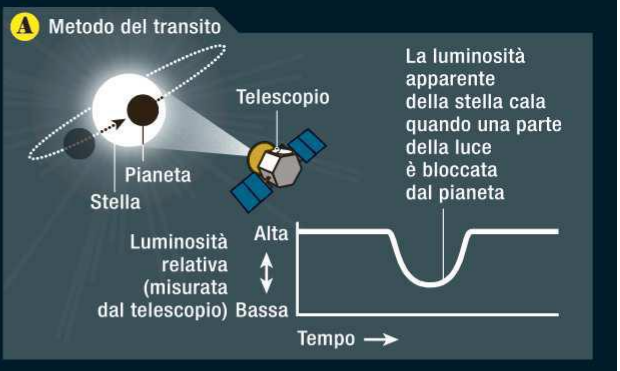
In cerca di pianeti

Il miglior strumento degli astronomi per trovare esopianeti attorno ad altre stelle – il Kepler Space Telescope – terminerà presto la sua missione. Al suo posto saranno lanciati due nuovi osservatori dedicati alla caccia ai pianeti: il Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) e il Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS).

Piano di osservazione

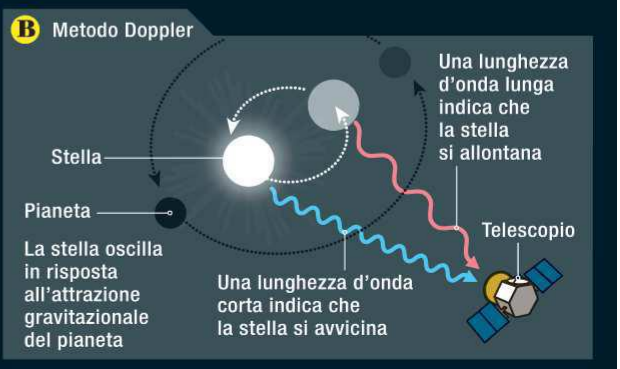
Mentre Kepler cerca i pianeti in una piccola area di cielo, TESS sarà in grado di coprire circa il 90 per cento della sfera celeste. Le quattro telecamere del telescopio conferiranno un ampio campo visivo che copre 24 gradi per 96. TESS dividerà il cielo in 26 settori di osservazione sovrapposti e passerà un mese a visualizzarne ognuno. CHEOPS, al contrario, studierà singole stelle per le quali c'è già il sospetto che ospitino mondi, in modo da osservarne le eclissi e ottenere dati migliori.





Come trovare pianeti

I telescopi Kepler, TESS e CHEOPS usano il metodo del transito per identificare mondi attorno ad altre stelle. **A** Quando i pianeti passano davanti alla loro stella (visti dalla Terra), bloccano una parte della luce stellare, diminuendone la luminosità. Grazie a questo oscuramento si possono identificare pianeti troppo fiochi per essere visti direttamente. Il metodo dell'oscillazione **B** cerca stelle che oscillano invece di attenuarsi. Se lo spostamento Doppler mostra che una stella si muove avanti e indietro con un ritmo regolare, deve essere la forza gravitazionale di un pianeta a spostarla mentre le orbita intorno. La tecnica non richiede che stella e pianeta siano allineati dal punto di vista della Terra.



Per esempio TESS potrebbe trovare indizi che fanno pensare a un pianeta interessante, ma scarsamente significativi dal punto di vista statistico. In tal caso, io o uno dei miei colleghi di TESS prenderemo la linea telefonica dedicata che ci collega con la squadra di CHEOPS per chiedere se riescono a vederlo meglio. Oppure pensiamo a Proxima Centauri e Ross 128, due stelle vicine per cui la tecnica Doppler ha dato tracce dell'esistenza di pianeti di massa terrestre. CHEOPS sarà in grado di verificare la presenza di eclissi da parte di questi e altri pianeti. Il telescopio richiederà ancora un bel po' di fortuna perché la probabilità di osservare l'orbita dalla direzione giusta è piccola; per Proxima Centauri è appena dell'1,4 per cento. Ma se facessimo centro, su quei pianeti impareremmo molto più che in qualsiasi altro modo.

Piccole stelle

Questi nuovi strumenti ci porteranno alla frontiera successiva della caccia ai pianeti, ma anche loro hanno degli svantaggi. Per essere sicuri che l'attenuazione di una stella sia provocata da un corpo che le passa davanti invece che da un problema negli strumenti, gli scienziati preferiscono veder ripetere l'attenuazione almeno una volta, meglio ancora più volte. TESS invece osserverà una data stella solo per un mese, un tempo non sufficiente per assistere a più transiti di pianeti come la Terra che impiegano un anno per orbitare attorno alle loro stelle. Una piccola percentuale del cielo, in cui si sovrappongono tutti i settori di osservazione di TESS, verrà osservata anche per un anno, un arco di tempo comunque molto più breve dello sguardo quadriennale di Kepler.

Di conseguenza TESS sarà limitato a trovare pianeti che orbitano molto rapidamente, in poche settimane o meno, che non è il massimo. Questa breve durata delle orbite è stata il principale compromesso accettato dagli scienziati per far rientrare la missione in un *budget* di 228 milioni di dollari. Abbiamo deciso che come limite era accettabile perché Kepler ci ha insegnato che c'è una varietà enorme di pianeti con orbite brevi: mondi di lava, pianeti a bassa densità, pianeti che interagiscono caoticamente e pianeti che si stanno apparentemente disintegrando nell'immane calore delle loro stelle. TESS troverà gli esempi più vicini e più facili da studiare di questi pianeti esotici. Un vero pianeta simile alla Terra attorno a una stella simile al Sole, però, dovrà aspettare.

In ogni caso, TESS è una parte importante della ricerca a lungo

Illustrazione di Jen Christiansen

termine di vita su altri pianeti. Prevediamo che TESS troverà una dozzina di pianeti all'interno delle rispettive zone abitabili, più o meno quanti ne ha trovati Kepler. Il trucco è nello smettere di insistere sulle stelle di tipo solare. Gli astronomi amano parlare del Sole come di una stella ordinaria, una fra le centinaia di miliardi nella Via Lattea, ma è una piccola bugia innocente: il Sole è al di sopra della media. La maggior parte delle stelle nella nostra galassia sono nane rosse, stelle più fredde e deboli con meno della metà della massa del Sole; se il Sole fosse un riflettore su un palcoscenico, una nana rossa sarebbe una candela.

Bisogna andare molto più vicini a una candela per ottenere lo stesso calore di un riflettore, quindi la zona ospitale di una nana rossa è molto vicina alla stella, dove i periodi orbitali sono brevi. Consideriamo una nana rossa di massa pari a un quinto di quella del Sole: un pianeta nella zona abitabile le girerebbe intorno in poche settimane, rientrando nel terreno di caccia di TESS.

Kepler ha esaminato migliaia di nane rosse, e ha scoperto che sono piene di pianeti vicini, addirittura più spesso delle stelle simili al Sole. Tra le centinaia di migliaia di stelle che osserverà TESS ci sono circa 50.000 nane rosse; sebbene siano fioche, compensano essendo piccole, il che permette ai pianeti di oscurarne più facilmente una porzione significativa nel transito, offrendo ai telescopi una riduzione osservabile della luminosità. Per esempio, un pianeta sarebbe osservabile con la stessa facilità se passa davanti a una stella 16 volte meno luminosa di un'altra, purché la prima abbia raggio metà della seconda. Anzi, i pianeti di fronte alle nane rosse sono così nitidi che non è nemmeno strettamente necessario usare un telescopio spaziale per rilevarli.

Per questo motivo sono in corso diversi progetti con i telescopi terrestri per dare la caccia ai pianeti attorno alle nane rosse. Dato però che sono fioche, si devono usare telescopi grandi, che hanno necessariamente un campo visivo ristretto. Bisogna monitorare le stelle una alla volta, il che ne fa progetti a bassa efficienza e a lungo termine. Dopo anni di ricerche, da questi studi sono emersi solo tre sistemi planetari, che però sono tra le scoperte più sensazionali del settore. A inizio 2017 uno di questi sistemi, TRAPPIST-1, ha fatto notizia sui mezzi di informazione. Questo minuscolo sistema planetario ha sette pianeti – sì, sette – di tipo terrestre stipati attorno a un oggetto di massa così bassa che si può definire a malapena stella, e almeno due dei sette pianeti si trovano nella zona abitabile. Il nome «TRAPPIST» è in teoria un acronimo, ma in realtà è uno dei tipi di birra preferiti del direttore belga della ricerca, Michaël Gillon, che adesso ha battezzato un progetto più ambizioso «SPECULOOS», il nome di uno dei suoi biscotti preferiti.

I passi successivi

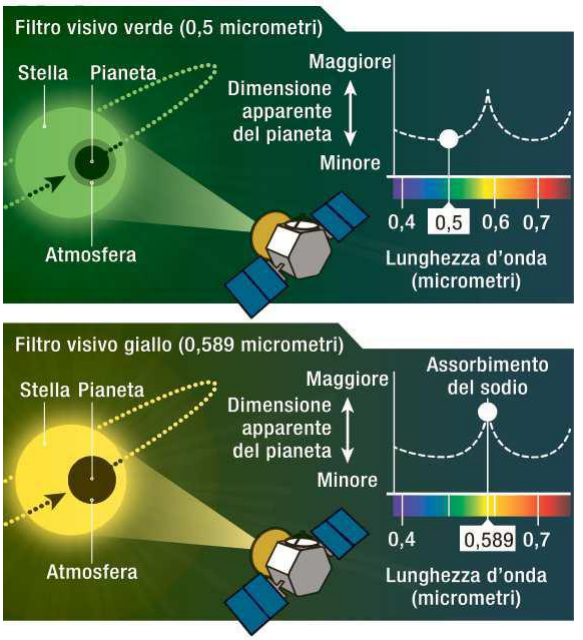
Dopo tutte queste missioni spaziali e progetti a terra conosceremo a sufficienza le posizioni di migliaia di pianeti in transito che hanno stelle luminose a sufficienza per successivi studi dettagliati. Possiamo pregustare le misurazioni delle masse, lo studio delle strutture planetarie e ancora più indizi per una corretta teoria della formazione dei pianeti. E se tutto andrà bene avremo una collezione crescente di pianeti potenzialmente abitabili di dimensioni terrestri.

E poi? Come fare il passo successivo e capire se questi pianeti potenzialmente abitabili sono abitati? L'approccio tradizionale, caldeggiato fin dagli anni cinquanta consiste nel puntare un grande radiotelescopio verso la stella e sperare di sintonizzarci sulle trasmissioni di un'eventuale civiltà aliena intelligente. Sebbene sia un piano valido, non abbiamo idea se possa funzionare.

FIRME DEI PIANETI

Scrutare le atmosfere

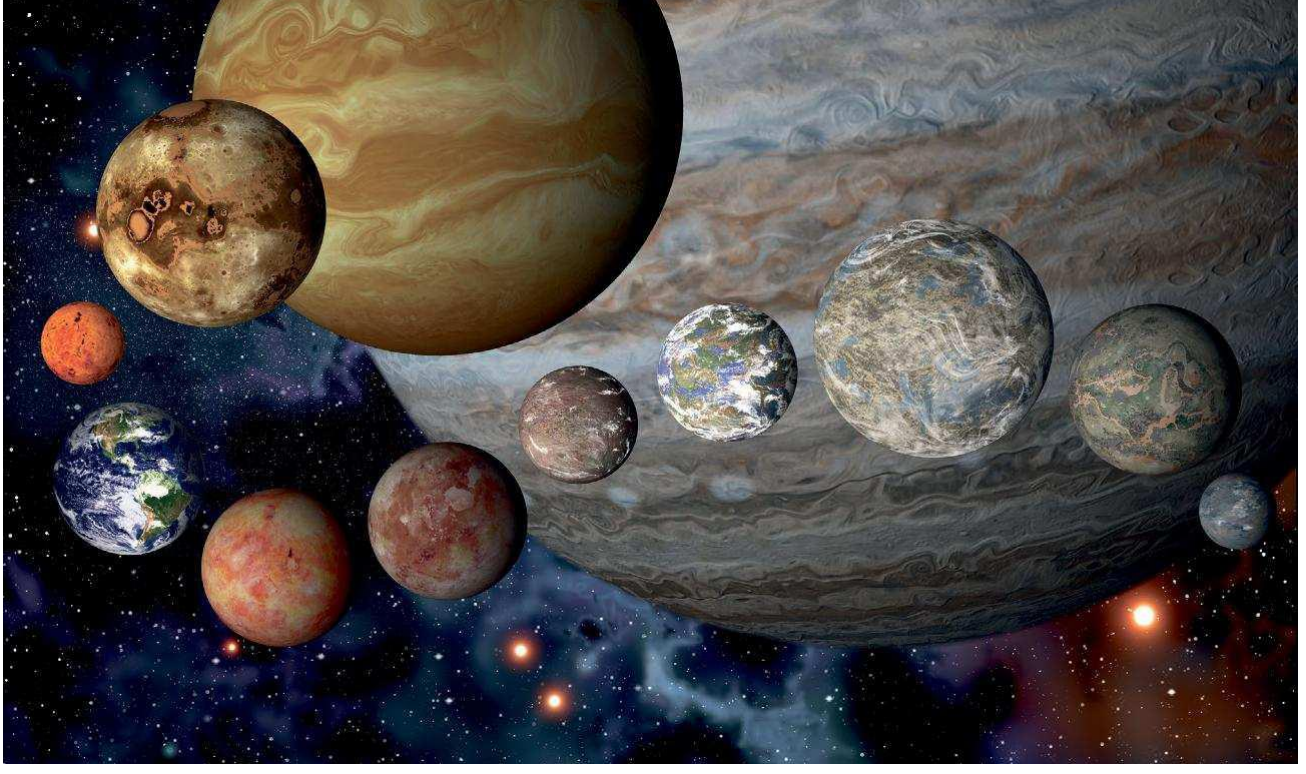
Oltre a rilevare semplicemente la presenza di esopianeti, i transiti a volte ci dicono di che cosa sono fatte le loro atmosfere. Quando un pianeta eclissa la propria stella, una parte della luce stellare passa attraverso l'atmosfera del pianeta mentre si dirige verso la Terra. Ogni atomo e ogni molecola assorbono e modificano alcune lunghezze d'onda specifiche della luce, a seconda delle energie dei loro elettroni. Osservando le stelle attraverso filtri colorati e confrontando quali lunghezze d'onda emergono quando un pianeta sta bloccando la stella e quando ne è lontano, i ricercatori possono isolare le firme luminose appartenenti al pianeta.



Un altro approccio consiste nell'analizzare l'atmosfera del pianeta in cerca di segni di vita. Possiamo farlo ricorrendo a un trucco legato al transito. Gli strati più esterni dell'atmosfera di un pianeta sono traslucidi, così quando il pianeta si trova davanti alla stella una piccola parte della luce stellare attraversa l'atmosfera planetaria ed emerge dalla parte opposta, proseguendo fino ai telescopi. Possiamo usare la spettroscopia per analizzare la composizione dell'atmosfera del pianeta. Ogni atomo o molecola ha certe lunghezze d'onda preferite che assorbe o devia; questo favoritismo deriva dall'insieme discreto di energie che gli elettroni hanno secondo la teoria quantistica. Il sodio, per esempio, ama una specifica sfumatura di giallo-arancione perché l'elettrone esterno di un atomo di questo elemento può facilmente assorbire luce dotata di una lunghezza d'onda di 589 nanometri.

Il trucco è monitorare lo spettro della stella prima, durante e dopo un transito. Durante il transito, atomi e molecole nell'atmosfera del pianeta rimuovono dalla luce stellare le loro lunghezze d'onda preferite, cambiando leggermente lo spettro osservato della stella. Dopo che il transito è finito vediamo di nuovo lo spettro ordinario, non alterato, della stella. Se facciamo tutto con attenzione, possiamo misurare la differenza tra spettro normale e spettro del transito, e isolare i piccoli cambiamenti provocati dal pianeta.

Illustrazione di Jen Christiansen



Tra i molti mondi che sono stati scoperti finora ci sono giganti gassosi, mondi di lava e addirittura pianeti che in qualche misura somigliano alla nostra Terra.

Gli astronomi hanno applicato questa tecnica a pianeti in transito delle dimensioni di Giove e ad alcuni delle dimensioni di Nettuno e Urano. Nelle atmosfere aliene hanno trovato molecole come metano, monossido di carbonio e acqua. La tecnica non è stata però mai applicata a pianeti di dimensioni terrestri, perché i loro segnali sono troppo esigui, e le uniche stelle attorno a cui li abbiamo trovati finora sono troppo distanti e fioche. Ma se mai trovassimo ossigeno in un'atmosfera esoterrestre, sarebbe eccitante. Se la Terra ha tanto ossigeno in atmosfera è per via della presenza di forme di vita; se la vita sulla Terra scomparisse improvvisamente, entro pochi milioni di anni le rocce nella crosta terrestre assorbirebbero tutto l'ossigeno producendo ossidi. Quindi l'idea è che un pianeta con abbondanti quantità di ossigeno potrebbe ospitare qualche tipo di organismo. La speranza è che grazie alle prossime osservazioni si possano identificare pianeti di dimensioni terrestri attorno a stelle così luminose da poter interrogare le atmosfere.

Da questo punto di vista, TESS, CHEOPS e SPECULOOS faranno da «mirini» per il prossimo grande osservatorio, il James Webb Space Telescope, da 10 miliardi di dollari, previsto per il 2020. Tra l'altro, questa meraviglia tecnologica sarà di gran lunga lo strumento più potente disponibile per la spettroscopia dei corpi in transito. Il telescopio spaziale Webb ha però una durata di vita prevista di 5-10 anni, prima di esaurire il combustibile necessario per mantenere l'orbita. Questo orizzonte temporale rende urgente scoprire gli obiettivi migliori e più luminosi nella volta celeste.

Dato che il tempo di osservazione sul telescopio Webb sarà molto richiesto, alcuni astronomi degli esopianeti si sono uniti per proporre telescopi spaziali specializzati, che svolgerebbero solo spettroscopia di transito. La missione statunitense è denominata Fast Infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer (FINESSE), e la sua controparte europea è l'Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (ARIEL). In entrambi i nomi compare la parola «infrarosso» perché molecole come acqua e diossido di carbonio sono più facili da individuare alle lunghezze d'onda dell'infrarosso. Nel giro di un anno o due dovremmo sapere se FINESSE vedrà la luce, mentre ARIEL dovrebbe essere lanciata nel 2028.

Ancora più avanti ci sono progetti per un veicolo spaziale europeo chiamato PLATO, il cui lancio è previsto per il 2026: lo possiamo vedere come un super-TESS che avrà 24 telescopi con cui passare in rassegna il cielo, anziché solo quattro. PLATO dovrebbe essere in grado di cercare pianeti con una maggiore sensibilità e per più tempo rispetto ai telescopi che lo avranno preceduto. Non meno importante, la qualità dei dati di PLATO sarà sufficientemente elevata da rilevare le variazioni di luminosità associate alle oscillazioni di una stella. Adesso sappiamo che le stelle, come qualsiasi oggetto fluido, si increspano formando onde che in qualche modo sono simili a quelle dei terremoti, motivo per cui il loro studio va sotto il nome di «astrosismologia». Frequenza e andamento di queste oscillazioni dipendono da parametri della struttura interna della stella, come densità e composizione. Quando PLATO troverà un pianeta, avremo anche una conoscenza più profonda delle proprietà fondamentali della stella, compresa una che al momento ci è celata: la sua età. Con il passare del tempo le oscillazioni rivelano l'età perché la fornace nucleare al centro di una stella converte sempre più idrogeno in elio, producendo sottili cambiamenti di frequenza delle onde in superficie. Attraverso l'astrosismologia possiamo dire se in una stella è appena iniziata la fusione o se è attiva da 10 miliardi di anni; saremo in grado di vedere come evolvono i sistemi planetari su scala cosmica.

Tra l'analisi in corso dei dati di Kepler e le prossime missioni TESS, CHEOPS, Webb e PLATO, l'agenda della caccia al pianeta è piena. Siamo pronti per tuffarci in questo mare senza limiti che abbiamo iniziato a esplorare, e tutti i giovani astronomi in erba che sono stati affascinati dall'eclissi solare della scorsa estate avranno molte eclissi planetarie da studiare, quando cresceranno. ■

PER APPROFONDIRE

Transiting Exoplanet Survey Satellite. Ricker G.R. e altri, in «Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems», Vol. 1, n. 1, articolo n. 014003, gennaio 2015. **https://tinyurl.com/y9ztnvwp.**

Il sito web della Extrasolar Planets Encyclopaedia: **http://exoplanet.eu.**

Albe di cieli lontani. Lemonick M.D., in «Le Scienze» n. 541, settembre 2013.

CHIMICA

L'isola dei pesi massimi

La creazione degli elementi più pesanti al mondo e l'esplorazione dell'«isola della stabilità» della tavola periodica, dove questi elementi esistono per più di un attimo, sono gli obiettivi di diversi gruppi di ricerca

di Christoph E. Düllmann e Michael Block

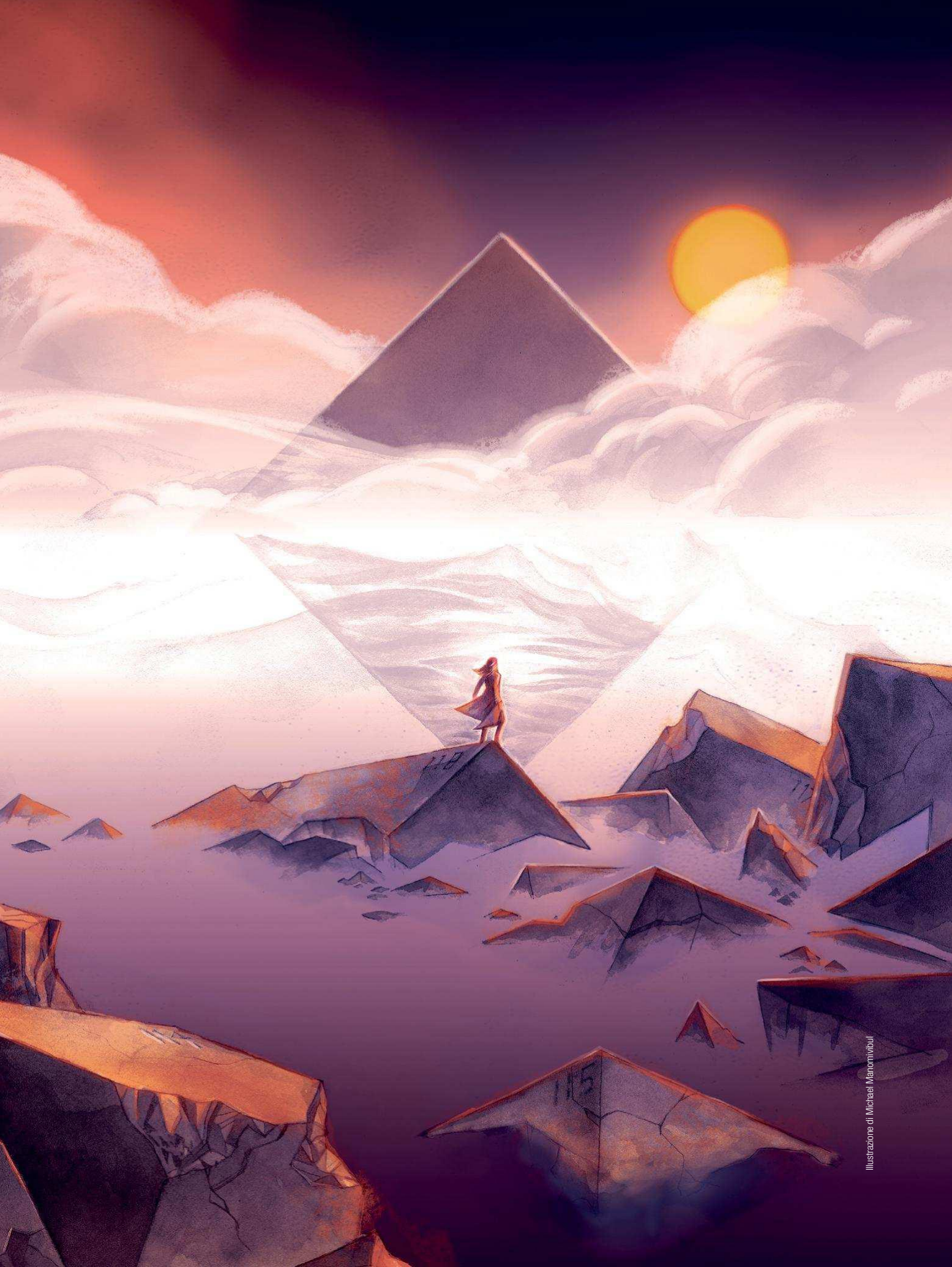


Illustrazione di Michael Manomivibul

Christoph E. Düllmann è un chimico nucleare della Johannes Gutenberg-Universität di Magonza, del GSI Helmholtz Center per la ricerca sugli ioni pesanti di Darmstadt e dell'Helmholtz-Institut di Magonza, in Germania. Studia sintesi e proprietà nucleari e chimiche degli elementi superpesanti e dei loro composti.

Michael Block è un fisico nucleare del GSI Helmholtz Center per la ricerca sugli ioni pesanti, dell'Helmholtz-Institut di Magonza e della Johannes Gutenberg-Universität di Magonza. Le sue ricerche si concentrano su misurazioni di precisione delle proprietà degli elementi più pesanti.

L'elemento più pesante mai trovato dall'umanità si chiama oganesson (od oganesso). Ogni suo atomo racchiude nel suo denso nucleo niente meno che 118 protoni. All'estremo opposto l'idrogeno, l'elemento più abbondante dell'universo, che si trova nel nostro corpo, negli oceani della Terra e addirittura nell'atmosfera di Giove, ha un solo protone. La scoperta dell'oganesson è stata annunciata nel 2006, quando un gruppo di ricerca russo-statunitense, usando un acceleratore di particelle a Dubna, in Russia, aveva scagliato miliardi di miliardi di ioni calcio contro un bersaglio di atomi pesanti. Dopo 1080 ore di collisioni, i ricercatori avevano ottenuto tre atomi di questa nuova sostanza superpesante.

Pochi millisecondi dopo non c'erano più.

Ma considerando con attenzione tutte le radiazioni e gli atomi più piccoli prodotti dalle reazioni gli scienziati del Joint Institute for Nuclear Research in Russia potevano essere piuttosto certi che, per una breve frazione di secondo, avevano creato l'elemento. Nel 2015, dopo oltre un decennio di controlli e verifiche, l'elemento 118 è entrato ufficialmente nella tavola periodica degli elementi, il libro mastro della materia dell'universo. È stato chiamato «oganesson» in onore di Jurij Oganesian, dell'istituto in cui è stato ottenuto l'elemento, un pioniere di questa ricerca.

Ma quanti altri elementi ci sono ancora? Negli ultimi dieci anni gli scienziati hanno continuato ad aggiornare la tavola periodica, aggiungendo nuovi atomi più pesanti che mai. Ognuno dei frammenti fondamentali della natura è definito dal numero di protoni contenuti nel suo nucleo atomico. Nella stessa occasione in cui è diventato ufficiale l'oganesson sono stati aggiunti alla tavola periodica anche gli elementi contenenti 113, 115 e 117 protoni in ogni atomo. Uno di noi (Düllmann) ha effettuato alcuni dei primi esperimenti di chimica su vari elementi superpesanti, e Block ha lavorato alle prime misurazioni dirette della massa e ad altri studi su di essi. Ogni nuova specie atomica è entusiasmante, perché rappresenta un materiale sconosciuto, una forma di materia che gli esseri umani non hanno mai incontrato prima.

Non possiamo tenerli con noi, però. I pochi atomi che creiamo esistono solo per brevi istanti, prima di collassare o di trasformarsi per effetto dei troppi protoni carichi positivamente che si respingono a vicenda. Ma si sospetta che alcuni elementi e isotopi (versioni dello stesso elemento con numeri diversi di neutroni) superpesanti ancora non scoperti potrebbero interrompere questa frustrante situazione di esistenze fuggevoli. Ipotizziamo elementi che possono resistere per minuti e forse anche anni senza decadere. Se così fosse, formerebbero una regione cercata da molto tempo all'interno della tavola periodica, la cosiddetta «isola della stabilità». Grazie a speciali configurazioni all'interno dei loro nuclei, che garantiscono una stabilità insolita, gli elementi superpesanti che vivono in questa regione potrebbero non essere solo creazioni effimere di laboratorio, ma avere un'esistenza duratura. Ultimamente gli scienziati stanno scoprendo atomi che potrebbero rappresentare le coste di quest'isola.

L'elemento 114, per esempio, decade un po' meno rapidamente di quanto avessero previsto alcuni calcoli per un atomo gremito da quel numero di protoni. E l'emivita di alcuni degli elementi superpesanti scoperti di recente – cioè il tempo necessario affinché metà degli atomi decada in un altro elemento – si allunga (per quanto sia pur sempre molto breve) via via che aumenta il numero di neutroni (i compagni senza carica dei protoni nei nuclei ato-

IN BREVE

Gli scienziati cercano di ottenere elementi sempre più pesanti formando atomi con un numero sempre più grande di protoni nei loro nuclei.

La maggior parte di questi elementi «superpesanti» ha vita estremamente breve, ma la teoria prevede che atomi con le giuste combinazioni di protoni e neutroni potrebbero diventare stabili e durare per minuti, giorni o addirittura anni, sempre che gli scienziati riescano a produrli.

Questi atomi formerebbero un'«isola della stabilità» nella tavola periodica degli elementi. I ricercatori ritengono che alcuni atomi scoperti di recente potrebbero rappresentare le coste di questa isola.

La tavola periodica

Il diagramma fondamentale della chimica organizza gli elementi noti in base al numero di protoni presenti nel nucleo dei loro atomi. Gli scienziati cercano di espandere la tavola scoprendo elementi più pesanti con un numero sempre più grande di protoni. Bisogna convincere gli elementi «superpesanti» (*in rosa*) a manifestarsi in esperimenti di laboratorio, perché sono troppo instabili per esistere in natura: molti decadono subito dopo essersi formati.

Numero atomico (numero di protoni nel nucleo dell'atomo)

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	* 57–71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	** 89–103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118
119	120																

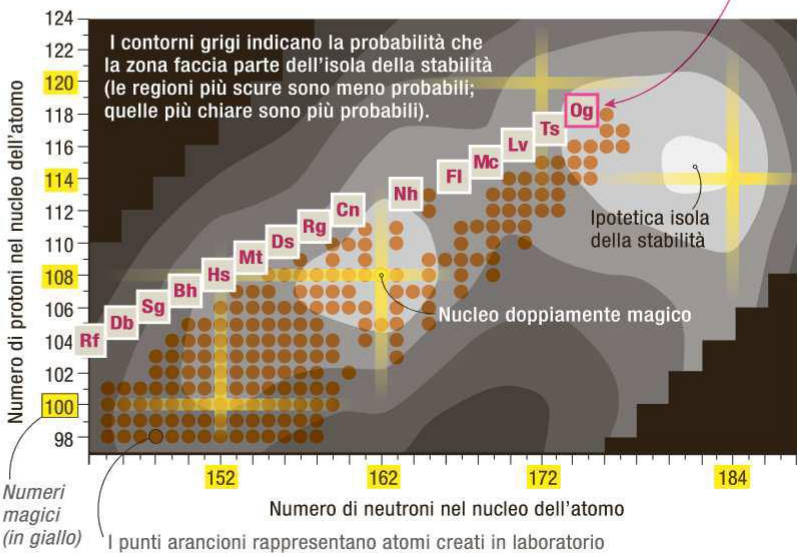
Posizioni ipotetiche degli elementi 119 e 120, ancora ignoti

I lantanidi (*) e gli attinidi (**) sono raggruppati insieme al di fuori del corpo principale della tavola per via delle loro proprietà chimiche simili

*	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
**	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

L'isola della stabilità

Poiché ogni protone aggiunge una carica positiva che respinge gli altri protoni, più grande è il loro numero, più facilmente il nucleo si decompone. Ma atomi ancora non scoperti potrebbero invertire la tendenza, diventando stabili grazie a speciali disposizioni di protoni e neutroni, che si pensa occupino «gusci» nel nucleo, ognuno dei quali ospiterebbe un numero specifico di particelle. Un guscio è più stabile quando è pieno, così i numeri di protoni e neutroni necessari per riempire un guscio sono detti «magici». Alcuni numeri hanno più probabilità di essere magici in combinazione con altri numeri (nuclei «doppiamente magici»). La teoria suggerisce che 114 protoni e 184 neutroni, per esempio, possano essere numeri magici insieme, ma ancora non è stato creato un atomo con questa combinazione. Se ci si riuscisse, potrebbe far parte di un'isola della stabilità, in cui gli elementi superpesanti diventano longevi.



Infografica di Jen Christiansen. Fonte: Christoph E. Düllmann

mici). Queste osservazioni combaciano con le previsioni: tradizionalmente si ipotizza che l'isola si trovi in una zona della tavola periodica in cui gli atomi hanno circa 114 protoni e più neutroni di qualsiasi altra specie creata finora.

La scoperta di queste vite lievemente più lunghe – appena una frazione di una frazione di una frazione di secondo in più – ha dato nuovo impulso a quella che è stata una forza trainante per diverse generazioni di ricercatori sugli elementi pesanti. Ora che abbiamo iniziato a esplorare l'isola della stabilità, speriamo di tracciarne i confini, determinare la posizione del centro – dove si trovano gli isotopi più stabili – e scoprire per quanto tempo possano durare questi atomi.

Negli ultimi anni abbiamo intravisto dettagli affascinanti su questi strani abitanti dei territori estremi della tavola periodica. Le tecniche di laboratorio si sono sviluppate a tal punto che possiamo studiare la chimica degli elementi superpesanti che produciamo e determinare, per esempio, se a temperatura ambiente sarebbero metalli o gas. E se mai riuscissimo a ottenerne un chilogrammo, questi elementi potrebbero avere proprietà nuove, e potenzialmente utili, che li distinguerebbero da tutti i materia-

li conosciuti. Anche se le sostanze che produciamo continuano a decadere troppo presto per poterne tenere un po' fra le mani, possono aiutarci ad acquisire una conoscenza più profonda della chimica e della natura fondamentale della materia.

L'esplorazione dell'isola

La tavola periodica è il continuo tentativo della chimica di mappare questa natura fondamentale. Questo schema, sviluppato nel corso dell'Ottocento soprattutto dal chimico Dmitrij Mendeleev e indipendentemente dal chimico Julius Lothar Meyer, elenca gli elementi ordinati in base al loro numero atomico (il numero di protoni per atomo) e li allinea in modo da evidenziare somiglianze nel modo in cui reagiscono con gli atomi di altri elementi per formare composti chimici.

Fin dalla prima formulazione della tavola i chimici si chiesero quanto lontano potesse arrivare. L'elemento più pesante trovato in grandi quantità in natura è l'uranio, i cui nuclei contengono 92 protoni. Ma a ogni protone in più all'interno di un nucleo aumenta la carica positiva, e insieme a essa la cosiddetta forza di Coulomb, che respinge tra loro cariche con lo stesso segno. A un certo punto questa repulsione diventa più forte dell'«interazione forte» attrattiva che lega insieme i nuclei atomici, e il nucleo si scinde, in un fenomeno detto fissione.

Ora che esploriamo l'isola della stabilità, speriamo di tracciarne i confini, determinare la posizione del centro, dove ci sono gli isotopi più stabili, e scoprire per quanto tempo durano questi atomi

Tuttavia la stabilità di ogni specifico elemento non dipende solo dal numero di protoni che contiene, ma anche dalla disposizione dei protoni e dei neutroni nel nucleo atomico. Secondo il modello sviluppato dai premi Nobel Maria Goeppert-Mayer e J. Hans D. Jensen alla fine degli anni quaranta, i due tipi di particelle costituenti formano vari «gusci» all'interno del nucleo. Sono una sorta di strati all'interno del nucleo che possono ospitare un numero specifico di protoni e neutroni, analoghi ai livelli elettronici che ospitano gli elettroni attorno al nucleo. In entrambi i casi i livelli completi portano a un legame più forte e danno una maggiore stabilità.

Gli scienziati concepirono il modello a guscio quando capirono che, per specifici numeri «magici» di protoni e neutroni (2, 8, 20, 28, 50 e 82), i nuclei sono più stabili e più difficili da scindere. Questi numeri magici, si capì poi, corrispondono a gusci completi. I numeri magici per i protoni e i neutroni negli atomi che conosciamo sono sempre gli stessi, ma non c'è alcuna garanzia che continuino così. Un nucleo in cui sia i livelli dei protoni che quelli dei neutroni sono pieni è chiamato doppiamente magico.

C'è ancora molto che non capiamo sui numeri magici. Per esempio, quali sono i numeri magici per i nuclei che non abbiamo ancora scoperto? Alcune ipotesi prevedono un nucleo superpesante doppiamente magico con 114 protoni e 184 neutroni. Sebbene l'elemento 114 sia stato ottenuto in laboratorio, non ne abbiamo generato una versione con 184 neutroni. Tuttavia la previsione relativa a questa combinazione magica, formulata per la prima volta negli anni sessanta, suggerisce che un simile isotopo sarebbe così straordinariamente stabile da avere un'emivita che si avvicina all'età della Terra. Questa previsione fu la prima occasione in cui venne ipotizzata l'esistenza dell'isola della stabilità, un concetto che ha entusiasmato il settore e continua a guidarci.

Non sappiamo ancora, però, se 114 e 184 siano veramente una combinazione magica. Altri quadri teorici prevedono, per esempio, configurazioni come 120 o 126 protoni e 172 neutroni. Alcune nostre previsioni sui numeri magici futuri hanno un debito nei confronti di Albert Einstein, che spiegò la sorprendente osservazione che la massa di un atomo è inferiore alla somma delle masse dei protoni, neutroni ed elettroni che lo costituiscono. La sua famosa formula $E = mc^2$ afferma che questo difetto di massa corrisponde all'energia di legame, l'energia che tiene insieme il nucleo. Pesando atomi con diverse composizioni di protoni e neutroni possiamo quindi identificare le configurazioni che danno un legame più forte – in altre parole, configurazioni che corrispondono a numeri magici – e determinare in che misura siano più stabili.

Quali che siano i prossimi numeri magici, riteniamo di aver cominciato a trovare l'isola della stabilità. È stato scoperto sperimentalmente che l'emivita degli elementi superpesanti aumenta con il numero di neutroni, il che fa pensare che ci stiamo avvicinando al prossimo numero magico di neutroni. Questa tendenza è ben mostrata, per esempio, nel caso dell'elemento 112 (copernicio, Cn): rispetto al Cn-277 (copernicio con 112 protoni e 165 neutroni), che vive per circa 0,6 millisecondi appena, il Cn-285 (copernicio con otto neutroni in più, per un totale di 173 neutroni) ha una vita circa 50.000 volte più lunga. Molto probabilmente questa tendenza continuerà verso il centro dell'isola della stabilità, ma se esistano o meno elementi superpesanti che siano stabili in modo permanente è una questione ancora aperta.

Questa possibilità ha comunque innescato la ricerca di questi elementi in natura. Solo perché non li abbiamo osservati in grandi quantità, è il ragionamento, non significa che non ce ne possano essere tracce magari palesi. Potrebbero essersi formati insieme ad altri elementi più pesanti del ferro in circostanze violente come la collisione di due stelle dense, dette stelle di neutroni, spargendosi poi in tutto l'universo. In questo caso potrebbero trovarsi nei raggi cosmici che si irradiano verso di noi dallo spazio o potrebbero essere sopravvissuti all'interno di alcune rocce sulla Terra.

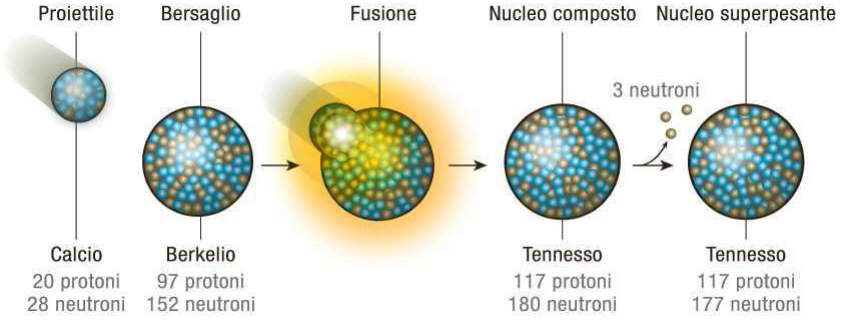
Sono state effettuate molte ricerche, usando tecniche diverse: per esempio si prevede che l'elemento 110 (darmstadtio) sia abbastanza stabile quando ha 184 neutroni – un numero magico – e ci si può aspettare che sia chimicamente simile al platino, che gli si trova direttamente sopra nella tavola periodica. Gli scienziati hanno usato tecniche come la fluorescenza a raggi X e la spettrometria di massa per cercare darmstadtio in minerali di platino presenti in natura, ma non ne hanno trovato tracce in quantità superiori a una parte su 10^9.

Gli scienziati hanno anche cercato segni di elementi superpesanti nei raggi cosmici, per esempio usando l'Ultra-Heavy Co-

ESPERIMENTO

Produrre elementi superpesanti

Per ottenere un nuovo elemento superpesante si accelera un nucleo «proiettile» contro un nucleo «bersaglio» e si spera che i due si combinino. Per superare la forza repulsiva tra i due nuclei carichi positivamente, il proiettile deve raggiungere circa il 10 per cento della velocità della luce. A questa velocità, proiettile e bersaglio possono avvicinarsi fino a toccarsi, e a quel punto entra in gioco la forza nucleare forte, che è attrattiva. Nell'esempio mostrato qui, viene generato l'elemento tennesso (o tennessio, o ancora tennessinio) fondendo calcio e berkelio. Dopo l'unione, il «nucleo composto» espelle tre neutroni e crea il nucleo superpesante del tennesso con 117 protoni e 177 neutroni.



Infografica di Jen Christiansen

smic-Ray Experiment a bordo della Long Duration Exposure Facility della NASA; anche qui però non hanno ottenuto prove certe. I tentativi continueranno sicuramente, perché una scoperta simile sarebbe molto significativa. Inoltre, nuovi elementi potrebbero tradursi in nuovi materiali, ognuno con proprietà uniche che potrebbero essere utili per la tecnologia e altre applicazioni.

Forgiare nuovi elementi

Dato che in natura non abbiamo ancora trovato nessun elemento superpesante, dobbiamo crearli noi stessi in laboratorio. Il procedimento consiste nell'arricchire i nuclei atomici di elementi «comuni» con ulteriori protoni. Fino a un certo punto, possiamo farlo imitando il processo usato dall'universo per formare elementi pesanti. I nuclei contenenti troppi neutroni sono inclini a trasformarne uno in un protone nel cosiddetto decadimento beta, che quindi produce un elemento più pesante, con un numero atomico incrementato di uno. Bombardando elementi pesanti con ulteriori neutroni possiamo ottenere elementi fino al fermio (elemento 100), ma finora non risulta che in un nucleo di fermio o di elementi più pesanti si sia verificato il corrispondente processo di trasformazione beta, dunque questo percorso finisce qui.

Per andare oltre, per creare elementi come l'inafferrabile oganesson, gli scienziati possono portare due nuclei in contatto abbastanza ravvicinato da far scattare l'interazione forte. Questa forza ha una portata estremamente corta, il che significa che i nuclei devono quasi toccarsi l'un l'altro per sentirla. Per farli giungere così vicini dobbiamo superare la forza repulsiva dei protoni carichi positivamente, il che significa che dobbiamo accelerare uno dei nuclei fino a circa il 10 per cento della velocità della luce e spararlo verso l'altro. Questa velocità è appena sufficiente per superare la repulsione coulombiana quando le superfici dei due nuclei si toccano l'una con l'altra. Ma la probabilità che i due nuclei si tocchino è estremamente piccola, e inoltre la fusione dei due nuclei iniziali in un singolo nucleo combinato è tanto più improbabile quanti più protoni il sistema contiene. E addirittura se si forma un simile nucleo «composto», spesso si ridivide in frammenti più leggeri quasi immediatamente. Entrambe le circostanze – la piccola probabilità che si formi un nucleo composto e la grande probabilità che si divida una volta formato – giocano fortemente contro la sintesi di elementi sempre più pesanti.

Nonostante le difficoltà, i ricercatori hanno raggiunto successi entusiasmanti usando questo approccio. Gli elementi 113, 115, 117 e 118, tutti realizzati seguendo questo percorso, hanno ricevuto i nomi ufficiali nel 2016. (L'Unione internazionale di chimica pura e applicata, o IUPAC, è la versione chimica del Guinness World Records e ha l'autorità di riconoscere e dare il nome ai nuovi elementi.) L'elemento 113 è ora chiamato nihonio, in onore del Giappone, dove sono stati condotti gli esperimenti per sintetizzarlo. L'elemento 115 è il moscovio, in onore della regione di Mosca, sede del Joint Institute for Nuclear Research, dove questo elemento è stato scoperto. E il 117 è stato chiamato tennesso (ma anche tennessio, o tennessinio) per lo Stato del Tennessee, dove l'Oak Ridge National Laboratory ha fornito i nuclei bersaglio di elemento 97 (berkelio) necessari per sintetizzarelo. L'oganesson, con i suoi 118 protoni, completa i nuovi arrivati.

Adesso ferve l'attività per trovare l'elemento 119, che inaugurerebbe una riga completamente nuova della tavola periodica. Sebbene diversi gruppi di ricerca, tra cui il nostro, siano andati a caccia di questi numeri più alti, fino a oggi nessuno è riuscito a scovarli, nonostante abbiano investito settimane e mesi presso gli acceleratori più potenti del mondo. Un ostacolo è rappresentato dal fatto che il percorso grazie a cui si è riusciti ad arrivare all'oganesson – unire atomi di calcio per formare nuclei più pesanti – è giunto alla fine con il numero 118, perché non abbiamo sufficienti quantità di nuclei con oltre 98 protoni da usare come bersagli. Ora gli scienziati stanno cercando di identificare quali combinazioni di elementi noti e disponibili offrano le migliori possibilità di generare nuove specie.

Una chimica strana

Anche se queste nuove specie decadono in un istante, di recente gli scienziati hanno fatto enormi progressi nella capacità di svolgere esperimenti nel breve lasso di tempo per cui durano gli elementi, in modo da scoprirne la chimica e le proprietà, per esempio se a temperatura ambiente si comportano più come metalli oppure gas.

L'elemento più pesante le cui proprietà chimiche sono state studiate dai ricercatori è il flerovio (elemento 114, Fl). La posizione del flerovio nella tavola periodica, sotto al piombo, implica che debba essere un tipico metallo pesante. Ma teorie risalenti al 1975 suggeriscono che in realtà potrebbe comportarsi più come un gas nobile, cioè un gas molto inerte che raramente interagisce con altri materiali.

Lo strano comportamento atteso del flerovio dipende dal numero di protoni nel suo nucleo e, quindi, dalla sua carica elettrica. La carica positiva elevata dei nuclei degli elementi pesan-

ti accelera i loro elettroni, carichi negativamente, fino a velocità che possono raggiungere l'80 per cento della velocità della luce e quindi farli ruotare attorno a quei nuclei in diverse forme orbitali che hanno spaziature differenti rispetto a quelle degli elementi più leggeri. Per il flerovio, per esempio, c'è un divario molto più ampio tra i livelli energetici dei suoi due orbitali elettronici più esterni rispetto a nuclei simili più piccoli, come il piombo, che si trova proprio sopra al flerovio. Nel caso del piombo la formazione di un legame chimico fornirà più facilmente rispetto al flerovio gli elettroni energetici necessari per superare questo divario. Di conseguenza il flerovio potrebbe non partecipare a reazioni chimiche come invece accade per la sua controparte più leggera. Può quindi somigliare ad altri elementi a cui non piace partecipare facilmente a reazioni chimiche – i gas nobili – più che a metalli tipici come il piombo.

È difficile, tuttavia, prevedere come si comporti di preciso il flerovio. In genere le teorie concordano sul fatto che dovrebbe essere più inerte del piombo, però probabilmente è più reattivo dei veri gas nobili e potrebbe formare, per esempio, deboli legami metallici con elementi come l'oro. Dato che non siamo riusciti a crearne in quantità sufficienti da poterlo osservare macroscopicamente, nessuno sa che aspetto avrebbe questo elemento in grandi quantità, ma alcune previsioni suggeriscono che possa essere bianco argenteo o grigio pallido ed essere solido a temperatura ambiente.

Queste nuove specie decadono in un istante, gli scienziati però ora possono effettuare esperimenti di durata breve come la vita di questi elementi, in modo da scoprirne la chimica

Le curiose proprietà del flerovio hanno spinto gli scienziati a non indietreggiare di fronte a nulla per sottoporlo a esperimenti, nonostante il fatto che possiamo produrne solo pochi atomi al giorno. Inoltre, anche i più longevi fra gli isotopi noti di Fl hanno un'emivita di appena uno o due secondi. Una delle migliori strutture che abbiamo per la produzione del flerovio è il TransActinide Separator and Chemistry Apparatus (TASCA) presso il GSI Helmholtz Center per la ricerca sugli ioni pesanti, in Germania. Lì spariamo un fascio di calcio-48 verso un bersaglio rotante coperto di plutonio-244. Quando otteniamo atomi di flerovio, i magneti li guidano verso un sistema chiamato Cryo-Online Multidetector for Physics and Chemistry of Transactinides (COMPACT). Questo macchinario è costituito da due insiemi di schiere di rivelatori fatti di silicio, lunghe 32 centimetri e disposte una di fronte all'altra a distanza di circa mezzo millimetro, in modo da formare uno stretto canale rettangolare, in cui il flerovio è spinto da un gas che fluisce rapidamente. I rivelatori sono coperti da un sottilissimo strato d'oro, che ci permette di studiare l'interazione degli atomi di flerovio con questo metallo. Il primo canale del rivelatore è mantenuto a temperatura ambiente, mentre l'estremità del secondo canale è raffreddata con azoto liquido fino a meno di –160 gradi Celsius, perché i legami deboli, tipici dei gas nobili, sono intensi a sufficienza per legare gli atomi di flerovio a basse temperature ma non in condizioni più calde. Se il flerovio si comporta più come un metallo che come un gas nobile, verrà adsorbito dall'oro al primo contatto, all'estremità calda del canale. Ma i gas nobili interagiscono troppo debolmente con l'oro per rimanere legati a temperatura ambiente, e quindi se il flerovio si comporta più come un gas nobile si legherà nella parte successiva del canale, o neppure lì.

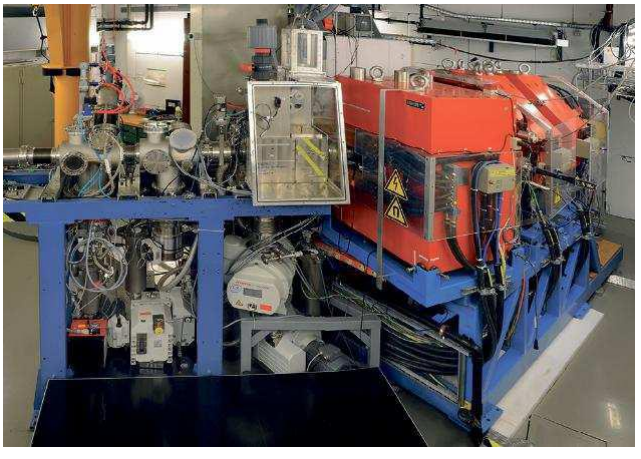
Quando il nostro gruppo di ricerca ha usato questa configurazione sperimentale abbiamo osservato due atomi decadere in entrambi i rivelatori a temperatura ambiente, suggerendo che il flerovio si fosse legato e poi fosse decaduto rapidamente, più come un metallo che come un gas nobile. Un altro esperimento precedente, però, diretto da un gruppo del Paul Scherrer Institut, in Svizzera, ed effettuato presso il Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, in Russia, ha osservato tre atomi. Uno era decaduto nella prima parte del canale, ma gli altri due sono stati trovati a basse temperature, intorno a –90 gradi Celsius. Gli sperimentatori hanno interpretato questo risultato come indizio di un comportamento più simile a un gas nobile. Al momento stiamo analizzando i dati ottenuti al GSI, che speriamo possano chiarire le proprietà di questo elemento appassionante.

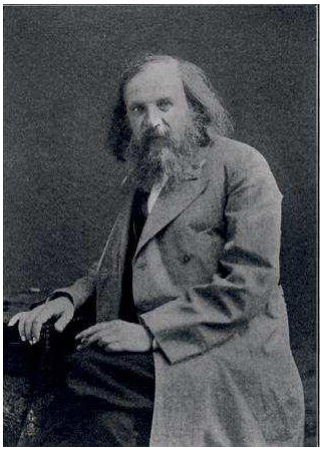
Scoperte superpesanti

Di recente uno di noi (Block) e il suo gruppo hanno effettuato i primi esperimenti di spettroscopia laser su un elemento superpesante: il nobelio, cioè l'elemento 102. Sono riusciti a produrre atomi di nobelio a un tasso di qualche particella al secondo scagliando atomi di calcio (20 protoni) contro un bersaglio di piombo (82 protoni). Block e colleghi hanno poi rallentato gli atomi di nobelio ottenuti in un gas di argon e li hanno colpiti con impulsi laser. Se gli impulsi hanno la giusta energia, un elettrone del nobelio assorbe l'energia del laser e si allontana dall'atomo. Variando la frequenza degli impulsi laser sono riusciti a misurare con precisione l'energia necessaria per strappare un elettrone dall'atomo del nobelio. Questa «energia di ionizzazione» è una delle proprietà caratteristiche di un elemento, che ne determina la posizione sulla tavola periodica. Indica quanto è probabile che l'elemento reagisca con altri elementi e formi legami chimici.

Prima abbiamo eseguito questi studi sull'isotopo No-254 (la versione del nobelio con 152 neutroni), estendendo di recente gli esperimenti a due ulteriori isotopi del nobelio, No-252 e No-253, per capire come i diversi contenuti di neutroni modifichino le energie che gli elettroni degli atomi sono in grado di assorbire. I risultati ci diranno come variano dimensione e forma dei nuclei di questi isotopi: configurazioni diverse dei nuclei carichi positivamente influenzeranno il modo in cui si comportano gli elettroni carichi negativamente.

Sono stati anche prodotti legami chimici tra elementi superpesanti e atomi più modesti per studiare come interagiscono le specie esotiche. Un esempio recente è la sintesi di molecole contenenti il seaborgio (elemento 106). Nel corso di esperimenti al RIKEN Nishina Center for Accelerator Based Science, in Giappone, il gruppo di Düllmann ha prodotto atomi di un isotopo di seaborgio con un'emivita di circa dieci secondi. Gli scienziati hanno poi





Mendeleev e i suoi nipoti. Sopra, una sezione dell'acceleratore lineare da 120 metri al GSI Helmholtz Center per la ricerca sugli ioni pesanti, usato per la sintesi di nuovi elementi; qui a fianco, il chimico russo Dmitrij Mendeleev, padre della tavola periodica; a sinistra, l'apparato TASCA, sempre al GSI Helmholtz Center per la ricerca sugli ioni pesanti, usato, tra l'altro, per la produzione di flerovio.

Cortesia G. Otto, GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research (*acceleratore*); cortesia G. Otto, GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research (*TASCA*); Heritage/AGF (*Mendeleyev*)

aggiunto monossido di carbonio nella camera contenente il seaborgio, e si è scoperto che l'elemento pesante si trasformava in un composto esacarbonilico, in cui cioè sei molecole di monossido di carbonio si legavano all'atomo centrale di seaborgio.

Düllmann e colleghi hanno scoperto che in questa situazione il seaborgio si comporta in modo molto simile al tungsteno e al molibdeno, suoi omologhi più leggeri e familiari, che hanno lo stesso numero di elettroni di valenza. In un esperimento con il seaborgio durato circa due settimane senza interruzioni, i ricercatori hanno osservato che questo elemento, rispetto al molibdeno e al tungsteno, formava lo stesso tipo di composti con molecole di monossido di carbonio, a ritmi simili. Ora gli scienziati vogliono verificare quale dei tre elementi formi i legami più stabili con il monossido di carbonio: calcoli effettuati alla fine degli anni novanta suggerivano che fosse il seaborgio, mentre calcoli più recenti e avanzati prevedono che il legame del monossido di carbonio con il seaborgio sia più debole del legame con il tungsteno.

Questi sono solo alcuni esempi degli affascinanti esperimenti attualmente in corso con gli elementi superpesanti e delle molte domande aperte a cui speriamo di rispondere. Anche se questi ultimi membri della tavola periodica sono assai esotici, gli studi sperimentali forniscono sempre più informazioni dirette su come si inseriscono nello stesso sistema di elementi in cui si trovano gli elementi più comuni che incontriamo nella vita quotidiana. Che siano instabili o longevi – e anzi, che si riesca o meno a trovare il cuore dell'isola della stabilità – gli elementi superpesanti hanno molto da insegnarci sul funzionamento dei costituenti chimici della natura. ■

PER APPROFONDIRE

Special Issue on Superheavy Elements. Düllmann C.E., Herzberg R.-D., Nazarewicz W. e Oganessian Y. (*a cura*), numero speciale di «Nuclear Physics A», Vol. 944, dicembre 2015.

Il gruppo Superheavy Elements Chemistry all'Università «Johannes Gutenberg» di Magonza, il GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research e l'Helmholtz-Institut Mainz: **www.superheavies.de.**

Pubblicazioni del Separator for Heavy Ion Reaction Products (SHIP) presso il GSI: **www.gsi.de/work/forschung/nustarenna/nustarenna_divisions/she_physik/publications.htm.**

Supermolecole da superatomi. Pavlus J., in «Le Scienze» n. 581, gennaio 2017.

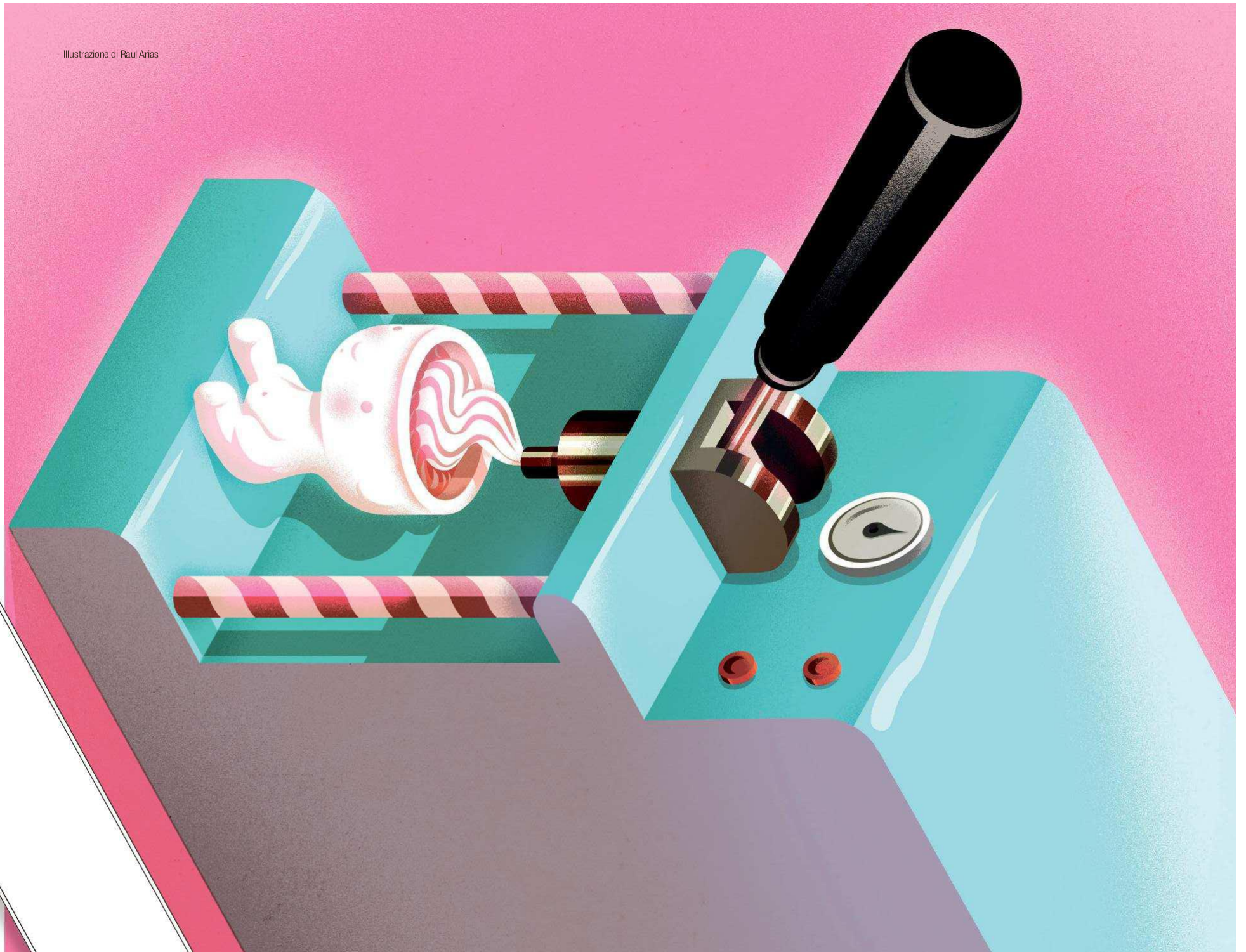


Illustrazione di Raul Arias

MEDICINA

GLI STRUMENTI DELLA PROCREAZIONE

In futuro gli scienziati potranno usare le cellule del sangue o della pelle al posto di spermatozoi e ovuli?

di Karen Weintraub

Karen Weintraub è giornalista *freelance* e si occupa di scienze e salute. Pubblica regolarmente su diverse testate, tra cui «New York Times», «STAT» e «USA Today».

I topi che sgambettano nella gabbia del laboratorio di Katsuhiko Hayashi non sembrano avere nulla di particolare. Corrono, mangiano e dormono come i loro simili. Eppure questi otto roditori hanno un'origine insolita, che Hayashi, biologo riproduttivo della Kyushu University del Giappone, ha svelato due anni fa sulle pagine di «Nature». Insieme ai suoi colleghi ha annunciato che questi topi dal pelo fulvo non sono nati dall'unione di spermatozoi e ovuli. Discendono, per parte di madre, da una cellula cutanea riprogrammata.

Questa innovazione, definita «straordinaria» da altri ricercatori, ha tenuto fede alle aspettative nate nel 1997, quando alcuni scienziati erano riusciti a clonare la pecora Dolly. La loro impresa, che a sua volta si rifaceva a studi degli anni settanta sulla clonazione delle rane, ha rivelato che ogni cellula animale è dotata dello stesso corredo di istruzioni basilari. Trasformando una cellula mammaria di pecora in un animale vivente, i creatori di Dolly hanno dimostrato che ogni cellula di mammifero ha gli stessi geni e che una cellula mammaria differisce da una qualsiasi altra cellula solo in base a quali geni sono attivati o disattivati.

In Hayashi e in altri scienziati quello studio ha acceso la speranza di poter riprogrammare le cellule di mammiferi per trasformarle in qualsiasi altra cellula, da un neurone a un ovulo, a condizione di trovare il giusto manuale di istruzioni. Alcuni ricercatori in tutto il mondo, tra i quali lo stesso Hayashi, sfruttano questo patrimonio di conoscenze per studiare la gametogenesi *in vitro* e generare cellule uovo e spermatozoi a partire da cellule adulte.

Gli studiosi della riproduzione e le coppie con problemi di sterilità seguono attentamente i progressi di Hayashi e degli altri scienziati, che sono riusciti a convertire cellule staminali di roditori (vale a dire cellule progenitrici che possono svilupparsi in qualsiasi tipo di cellula specializzata) in cellule spermatiche rudimentali. Se queste tecniche di produzione di ovuli e spermatozoi funzionassero negli esseri umani, forse un giorno potremmo essere in grado di sostituire i nostri gameti difettosi con cellule ematiche o cutanee. Quel giorno, gli uomini non dovrebbero più preoccuparsi se non hanno spermatozoi sani. E le donne, anziché veder diminuire le probabilità di diventare madri superati i trent'anni, potrebbero semplicemente donare un po' di sangue e ritrovarsi con una scorta di ovuli a qualsiasi età. Anche le coppie omosessuali potrebbero avere figli imparentati biologicamente a entrambi i genitori.

La speranza è viva, ma remota. Anni di esperimenti effettuati sugli animali con l'obiettivo di trovare sostituti affidabili di ovuli e spermatozoi, indispensabili per generare la maggior parte dei mammiferi, non hanno prodotto risultati soddisfacenti. Eppure, anche se in una fase molto preliminare, questo studio sui topi sta suscitando nella comunità scientifica un'ondata di dubbi etici sulle sue possibili applicazioni umane.

Gravidanze programmate

Per far funzionare questo processo riproduttivo nei topi, Hayashi ha dovuto mettere insieme scoperte precedenti. Nel 2010 ha provato a premere il tasto *reset* delle cellule, cioè a riportarle allo stadio in cui non hanno ancora definito la loro identità, prendendo spunto da un sistema sviluppato da Shinya Yamanaka della Kyoto University, in Giappone, premio Nobel nel 2012.

Per cominciare, i ricercatori hanno prelevato cellule cutanee dalla coda di un topo adulto e vi hanno iniettato una miscela contenente quattro geni specifici, per riportarle dallo stadio di cellule adulte a quello di staminali, capaci di svilupparsi in molte tipologie differenti di cellule. Successivamente hanno sfruttato le tecniche genetiche nate all'inizio degli anni duemila grazie ad Azim Surani, dell'attuale Gurdon Institute, nel Regno Unito, e a Mitinori Saitou, che all'epoca lavorava nel laboratorio di Surani. Nel complesso questo lavoro, insieme agli esperimenti correlati con cellule derivanti da normali embrioni di topo, ha aiutato Hayashi a individuare i geni necessari a indurre le cellule staminali a diventare precursori degli ovuli, ovvero cellule germinali primordiali.

C'era un problema però: le cellule germinali primordiali, che possono diventare sia spermatozoi sia ovuli, contengono ancora due corredi cromosomici, come tutte le cellule animali tipiche. Per formare cellule sessuali, con un solo corredo genetico da ciascun genitore, le cellule germinali devono subire per due volte un processo di divisione cellulare detto «meiosi». Nelle femmine, la prima divisione cellulare si verifica nell'embrione, quando la cellula germinale primordiale entra nel sistema riproduttivo. La seconda divisione avviene durante l'ovulazione, quando la cellula uovo è finalmente matura, grazie all'esposizione a una serie di ormoni. Dopo aver ottenuto la cellula germinale primordiale, Hayashi e colleghi sono riusciti a reinserirla in un topo vivo per completarne

IN BREVE

I mammiferi hanno bisogno di ovuli e spermatozoi per riprodursi. **Di recente** gli scienziati sono riusciti a trasformare nei topi cellule staminali in ovuli vitali. **Nel 2016** hanno creato otto topi in salute accoppiando spermatozoi con ovuli derivati da cellule della pelle. **I ricercatori** sperano che alla fine queste conquiste possano portare a ulteriori opzioni riproduttive per l'infertilità umana.

ESPERIMENTO INNOVATIVO

La ricetta per fare figli da cellule cutanee

Nel tentativo di aggirare la sterilità femminile, Katsuhiko Hayashi della Kyushu University, in Giappone, e colleghi cercano un modo per convertire le cellule cutanee in ovuli fecondabili. Dopo migliaia di esperimenti falliti, nell'autunno 2016 il gruppo ha ricreato l'ambiente chimico e le condizioni di laboratorio più adatti a riprogrammare le cellule cutanee dei topi e trasformarle in gameti utilizzabili. In seguito, grazie alle tecnologie della fecondazione in vitro, gli scienziati sono riusciti a fecondare gli ovuli coltivati in laboratorio con spermatozoi standard. Questo esperimento ha portato alla nascita di otto topi sani. I ricercatori sperano che le conoscenze acquisite grazie a questa tecnica possano stimolare gli scienziati a cercare nuove soluzioni per gli esseri umani.

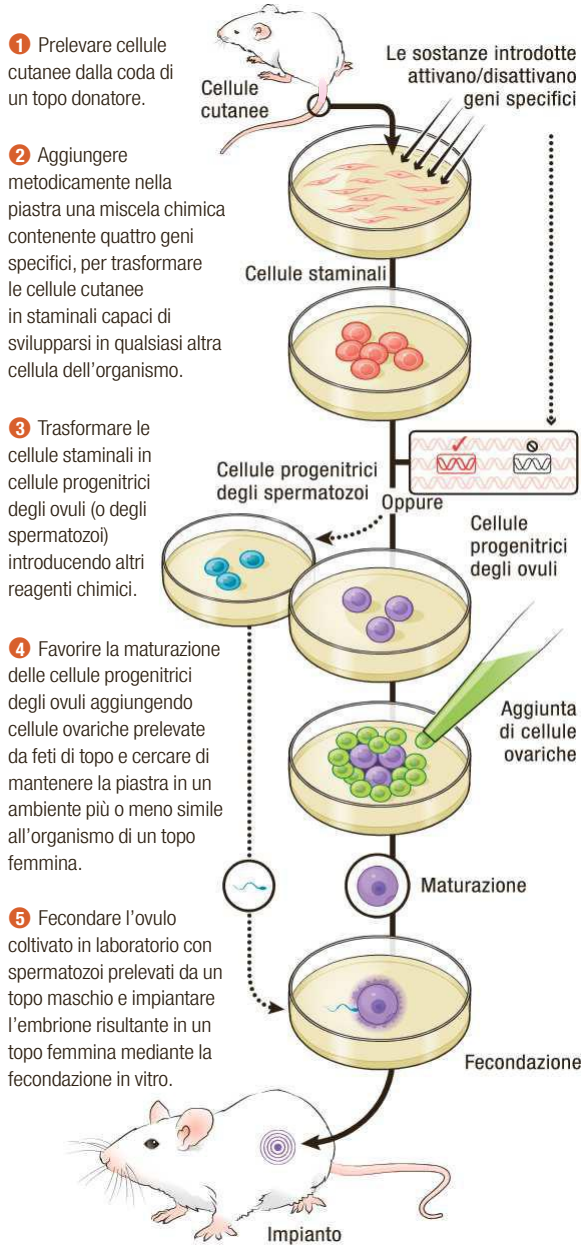


Illustrazione di Tarmi Tolpa

lo sviluppo, raggiungendo così quello che allora era considerato il confine della scienza. Tuttavia, per produrre artificialmente ovuli vitali, o utilizzabili, i ricercatori dovevano comprendere e ricreare ogni singola fase del percorso di maturazione.

Si è scoperto che il segreto stava nell'imitare scrupolosamente la natura. Gli scienziati hanno lavorato diversi anni per mettere a punto la soluzione in cui coltivare le cellule uovo convertite. La svolta è arrivata quando sono state aggiunte alcune cellule prelevate dalle ovaie di altri feti di topo nel mezzo di coltura in cui maturavano le cellule uovo. Le ovaie rilasciavano una miscela di ormoni, sostanzialmente creando un ambiente simil-ovarico che ingannava le cellule, convinte di trovarsi nel corpo di un topo. Gli scienziati hanno inoltre alterato la viscosità del liquido di coltura per imitare le condizioni presenti nell'organismo del topo.

Dopo aver ottenuto il mezzo di coltura più idoneo e fatto maturare le cellule uovo in laboratorio, le fasi successive erano analoghe a quelle della fecondazione in vitro (FIV). I ricercatori hanno prima fecondato gli ovuli maturi con normali spermatozoi di topo in vitro. Qualche giorno dopo hanno selezionato un embrione promettente e l'hanno iniettato in un topo femmina, che avrebbe incubato il feto per 20 giorni. Dopo molti tentativi falliti, in cui il topo abortiva o l'embrione non si impiantava o nasceva morto, la procedura ha prodotto un cucciolo sano, seguito dagli altri.

Il processo è ben lungi dall'essere perfetto. Solo 16 delle centinaia di cellule staminali create dal gruppo di Hayashi sono sopravvissute al processo di maturazione di cinque settimane. E anche quando le cellule uovo ottenute in laboratorio erano fecondate con lo sperma, solo una percentuale molto esigua di queste generava piccoli di topo sani (mentre con gli ovuli prelevati da topi adulti e fecondati in vitro il tasso di successo era del 62 per cento). In ogni caso, gli scienziati hanno dimostrato che il loro metodo potrebbe funzionare. Quegli otto cuccioli sono cresciuti, sani e normali. Si sono perfino accoppiati, generando altri piccoli.

Quando lo spermatozoo incontra l'ovulo

Sono in molti a ricorrere alla fecondazione assistita. Negli Stati Uniti, più del 10 per cento degli uomini e una percentuale simile di donne è considerata sterile. Le procedure per aggirare la sterilità sono ardue e spesso infruttuose. La FIV, per esempio, prevede che la donna sia sottoposta a una o due settimane di iniezioni ormonali affinché si formino più ovuli. In seguito alcuni di questi sono fecondati in laboratorio per poi essere reimpiantati in numero variabile, in genere uno o due. I costi, sostenuti in larga parte dalle coppie richiedenti, raggiungono facilmente i 20.000 dollari, e comunque il 65 per cento dei cicli di fecondazione in vitro fallisce, spesso a causa della scarsa qualità degli ovuli. Inoltre, la FIV è inutile quando la coppia non ha ovuli o spermatozoi sani.

Ecco perché la possibilità di usare cellule ematiche o cutanee per procreare rappresenta un'alternativa allettante. Invece di estrarre gli ovuli, si potrebbe semplicemente prelevare una fialetta di sangue alla madre potenziale. Secondo Hayashi, per gli esseri umani sarebbe più semplice usare il sangue, che è già prelevato abitualmente nelle strutture sanitarie, anche se in realtà la tecnica funziona sia con le cellule cutanee che con quelle ematiche.

Gli scienziati potrebbero trasformare in laboratorio le cellule del sangue in cellule staminali e, dopo poche altre fasi, in ovuli o spermatozoi. L'ovulo artificiale potrebbe quindi essere fecondato con spermatozoi normali (o viceversa) e impiantato nella donna con le stesse procedure della FIV: il figlio avrebbe lo stesso corredo genetico che erediterebbe normalmente da ciascun genitore.

Secondo Hayashi, oggi la procedura è troppo rischiosa per poter essere applicata agli esseri umani, e diventerebbe accettabile solo se gli ovuli prodotti dagli scienziati si trasformassero in embrioni sani con la stessa frequenza con cui avviene in natura. Per cominciare, i ricercatori dovranno dimostrare di poter mantenere in vita gli ovuli in laboratorio per un tempo sufficiente a emulare esattamente le condizioni necessarie allo sviluppo umano. (Nel topo, le cellule uovo maturano in cinque giorni, nelle donne in 30 giorni circa.) Tuttavia, prima di poter anche solo pensare di eseguire queste operazioni sulle cellule umane, gli scienziati della riproduzione dovranno provare che il processo funziona su animali più grandi e più simili agli esseri umani.

Crescere insieme

Per superare questo scoglio, Hayashi già lavora con i primati, più precisamente con gli uistitì. Ma i suoi progressi hanno incontrato grandi ostacoli. I topi sono un buon modello di ricerca, perché ovulano ogni cinque giorni e la gestazione dura 20 giorni. Negli uistitì invece la gravidanza si protrae per oltre 140 giorni, di conseguenza generare un figlio richiederebbe più tempo, anche se tutti i passaggi funzionassero alla perfezione. Le cellule germinali primordiali degli uistitì impiegano molto più tempo di quelle dei topi per diventare ovuli, e Hayashi deve ancora trovare un ambiente di laboratorio adatto a mantenere in vita queste cellule fino alla maturazione.

Nei roditori, i ricercatori hanno imparato a far maturare le cellule germinali primordiali all'esterno del corpo del topo, ma avevano comunque bisogno delle cellule ovariche dei feti murini per agevolare il processo. Per assicurarsi che le germinali primordiali sopravvivano e maturino negli uistitì – e per ampliare questo lavoro e coltivare molti più ovuli in laboratorio – Hayashi pensa che dovrà spingersi oltre il semplice trasferimento di cellule ovariche nelle piastre di coltura. Dovrà identificare le cellule ovariche specifiche che inviano segnali cruciali per la maturazione e capire come produrle dalle staminali. Così, in fasi successive del lavoro potrebbe essere in grado di coltivare tutti gli ingredienti necessari, anziché dover dipendere dalle cellule ovariche prelevate da altri feti.

Direttore della ricerca sulle linee germinali e sull'epigenomica del Gurdon Institute e pioniere del settore, Surani studia diverse combinazioni di queste cellule «aiutanti» fondamentali per favorire maturazione e comunicazione delle cellule germinali. «In effetti le cellule germinali arrivano fino a un certo punto, oltre il quale serve qualcosa di molto specifico per farle passare al punto successivo: forse un cambio di segnale o di ambiente, o chissà», spiega Surani. Lui e il suo gruppo stanno avanzando ipotesi plausibili su quali cellule possano essere particolarmente significative ai fini di questo processo, ma si tratta di un lavoro lungo e faticoso. Per poter progredire nello studio stanno analizzando feti umani abortiti, per ottenere informazioni su ogni fase della maturazione delle cellule uovo. Il laboratorio ha inoltre sostituito i topi con i maiali, sia perché lo sviluppo dei suini è più simile a quello umano sia perché è meno costoso lavorare con i maiali che con le scimmie.

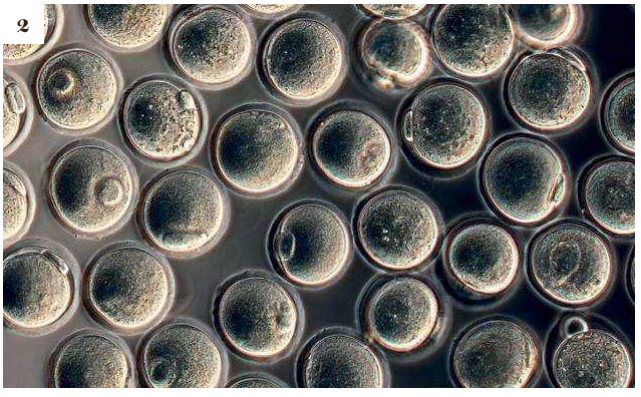
Invece di modificare i protocolli relativi alle piastre di coltura, ci sarebbe forse un altro modo per favorire il processo. Alcuni scienziati ritengono di poter ottenere risultati migliori trasferendo le cellule artificiali *in vivo* appena possibile, per sfruttare i naturali sistemi di controllo qualità dell'organismo, che eliminano i gameti difettosi e lasciano più risorse ai contendenti cellulari restanti. Renee Reijo Pera, specialista di cellule staminali alla Montana State University, ha adottato questo approccio in ricerche sulle cellule spermatiche. Pera spiega che in natura solo gli spermatozoi più adatti sopravvivono e fecondano l'ovulo, ma le cellule spermatiche prodotte e lasciate maturare in vitro non sono soggette a questa competizione, di conseguenza il rischio che spermatozoi difettosi fecondino gli ovuli è maggiore. Poiché il corpo è specializzato nell'eliminare gli spermatozoi inadatti, Pera si concentra sulla produzione di spermatozoi primordiali che possano maturare nei testicoli. «Riteniamo che la selezione spetti all'organismo» dice. «Procedendo in vitro, il mio timore è di forzare l'avanzamento di processi che nell'ambiente naturale non andrebbero avanti».

Indipendentemente dalle precauzioni adottate, alcuni critici sostengono che ovuli e spermatozoi artificiali non dovrebbero essere mai usati per la vita umana. Marcy Darnovsky, per esempio, è convinta che le cellule germinali create in laboratorio non saranno mai abbastanza sicure da giustificare i rischi collegati. Darnovsky è direttrice del Center for Genetics and Society, un'organizzazione no-profit impegnata a promuovere l'uso responsabile delle tecnologie genetiche negli esseri umani. Pur essendo favorevole agli studi che permettono di capire meglio lo sviluppo umano e animale, è contraria all'uso di ovuli e spermatozoi artificiali per generare nuova vita, soprattutto umana. «Penso che sia assai rischioso dal punto di vista biologico per gli eventuali figli così generati», dice, facendo l'esempio della clonazione dei mammiferi: molti embrioni clonati non sono riusciti a svilupparsi, e alcuni animali sono nati con gravissimi problemi di salute. Darnovsky ritiene necessarie politiche pubbliche per garantire che i progressi scientifici a cui puntano Hayashi, Surani, Reijo Pera e altri non si spingano troppo lontano.

Alcune preoccupazioni riguardano i possibili effetti sulla nostra concezione di genitorialità

Altre preoccupazioni riguardano i possibili effetti di questi metodi sulla nostra concezione di genitorialità. Per esempio, la possibilità di manipolare le cellule di chiunque per farne spermatozoi e ovuli non potrebbe far sì che, in futuro, le cellule di una persona siano trasformate in spermatozoi e ovuli, generando così una condizione uniparentale? E qualcuno potrebbe impossessarsi di una cellula cutanea di un'altra persona, prelevandola da un tovagliolo o dalle lenzuola, per fare un figlio senza il suo consenso, o addirittura a sua insaputa? Inoltre, come hanno scritto George Daley, preside della Harvard Medical School, e i suoi colleghi su «Science Translational Medicine» l'anno scorso, una simile tecnologia permetterebbe di generare embrioni in quantità impensabili in precedenza, agitando lo spettro della svalutazione della vita umana, nonché di complesse sfide politiche.

I ricercatori affermano che finora i dubbi etici hanno ostacolato qualsiasi sperimentazione sulla gametogenesi umana in vitro e ridotto al minimo i finanziamenti. Da tempo negli Stati Uniti sono in vigore restrizioni per gli studi sugli embrioni. L'amministrazione Obama era più aperta alle ricerche sulle staminali rispetto a quella precedente, ma molti prevedono che con Donald Trump ci sarà un'inversione di tendenza. Secondo Surani e Helen Picton, che effettua studi simili all'Università di Leeds, nel Regno Unito, anche in altri paesi la mancanza di fondi e le difficoltà nel reperire campioni di tessuti di embrioni naturali a fini comparativi complicano ulteriormente la sperimentazione. Hayashi, per esempio, sostiene che nel suo paese avrebbe molte difficoltà a effettuare studi su germinali umane. (Le leggi giapponesi proibiscono la fecondazione



I topi nati da ovuli artificiali e spermatozoi naturali di topo sono sani (*1*). Gli ovuli sono stati ricavati da staminali embrionali (*2*).

Katsuhiko Hayashi, Kyushu University; da *Mouse Eggs Made from Skin Cells in a Dish*, di David Cyranoski, in «Nature», Vol. 538, 20 ottobre 2016

di cellule germinali umane, anche a scopi di ricerca.) Invece Jacob Hanna, studioso di staminali al Weizmann Institute of Science, in Israele, ritiene di avere vita più facile, per via dell'interesse culturale nel progresso delle tecnologie riproduttive.

Un enigma etico

Anche senza dare vita a un neonato, per gli scienziati inseguire l'obiettivo di creare ovuli e spermatozoi produrrebbe già vantaggi: nelle terapie per la sterilità, nella comprensione delle prime fasi di sviluppo e nell'identificazione degli effetti che le tossine possono avere sull'ereditarietà umana. Capire come identificare ovuli e spermatozoi di alta qualità potrebbe migliorare il processo di selezione per la FIV, per esempio. E il perfezionamento della ricetta per creare i gameti permetterà di capire dove «sbagliano» le cellule che poi causano malattie, difetti alla nascita o morte cellulare.

Imparare a produrre ovuli e spermatozoi da cellule cutanee o ematiche potrebbe aiutare anche a capire meglio i meccanismi dell'ereditarietà genetica che rientrano nella cosiddetta «epigenetica»: cambiamenti a livello dell'espressione genica ma non dei geni. Capire come si formano spermatozoi e cellule uovo nei loro primissimi giorni potrebbe permetterci di analizzare queste cellule alla ricerca di gruppi metilici o di altri cambiamenti accumulati nei geni. Oggi è vivo il dibattito su come alcuni tratti sembrano essere trasmessi senza che ci sia un'alterazione dei geni sottostanti. Per esempio, in uno studio del 2016 sui figli di sopravvissuti all'olocausto nati anni dopo il trauma vissuto dai genitori, sono stati individuati cambiamenti epigenetici in aree geniche associate alla regolazione degli ormoni dello stress. I geni erano inalterati, ma apparentemente il loro comportamento era stato trasmesso da una generazione all'altra. Surani afferma che generare ovuli e spermatozoi da staminali potrebbe permettere di penetrare nel processo epigenetico e capire meglio le malattie legate all'invecchiamento, spesso causate dall'accumulo di marcatori epigenetici. Capire come questi *marker* sono cancellati nella cellula germinale in fase di sviluppo potrebbe portare a terapie per queste malattie.

Surani sta studiando il funzionamento dei mitocondri, la fonte energetica della cellula, nel processo di produzione degli ovuli. I mitocondri attraversano una fase di selezione durante la riproduzione, per cui il figlio riceve solo il materiale genetico della madre. Il sistema di correzione dei difetti mitocondriali non è ancora stato chiarito, ma Surani spera che lo studio di questo meccanismo da parte della cellula germinale possa insegnargli molto sull'energia cellulare e sulle malattie correlate. «Possiamo acquisire conoscenze che potrebbero avere un enorme impatto sulla salute», dice.

Hayashi spera che le ricerche possano servire anche a salvare e ripristinare specie quasi estinte, come il rinoceronte bianco. Approfondendo le conoscenze sul processo di formazione dei gameti, i ricercatori saranno più preparati a lavorare con specie a rischio di estinzione. Hayashi cerca di riprodurre il suo studio sui topi con le cellule di rinoceronte bianco, ma i progressi sono lenti. Oltre alle differenze legate ai processi riproduttivi delle due specie, con i rinoceronti il tempo di attesa è molto più lungo. Se nel topo il periodo di gestazione è di 20 giorni, nel rinoceronte è di 16 mesi.

Hayashi spiega che quando presenta il lavoro sul rinoceronte bianco raccoglie sempre reazioni positive. Ma quando accenna alla possibilità di ricerche simili sugli esseri umani «c'è chi è molto scettico, chi molto timoroso». Hayashi capisce queste preoccupazioni. Ci vorrebbero molte cellule germinali ed embrioni umani prima di riuscire a trasformare staminali umane in ovuli e spermatozoi utilizzabili. Inoltre, avverte, anche i gameti utilizzabili potrebbero comunque impicare un rischio di difetti alla nascita.

Reijo Pera è convinta che i bioeticisti siano favorevoli allo studio di queste scoperte per trovarne applicazioni umane, e perfino per sfruttarle e far nascere esseri umani, purché ne sia garantita la sicurezza. Sopravvissuta a un cancro e sterile, Pera ritiene che aiutare eventuali coppie ad avere bambini giustifichi la ricerca.

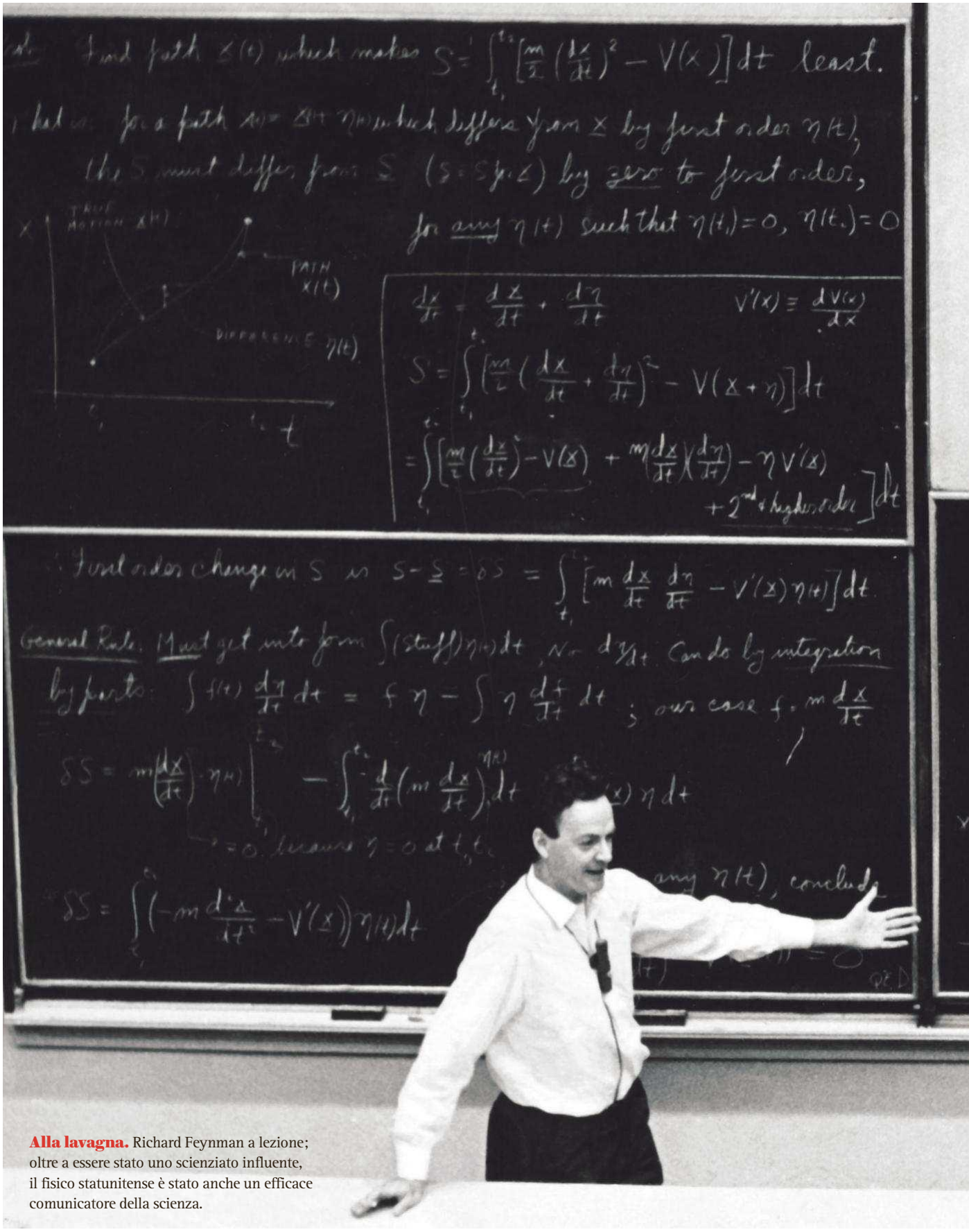
Eppure rimane la spinosa questione di che cosa debba essere considerato sicuro e chi abbia l'autorità di deciderlo. Quando gli scienziati hanno sviluppato altre tecnologie controverse, come la FIV e il sistema di editing genetico CRISPR, i convegni di ricercatori, bioeticisti e membri della società civile hanno aiutato a sviluppare raccomandazioni e linee guida relative alle loro potenziali applicazioni. Secondo ricercatori e bioeticisti, la gametogenesi in vitro richiederà lo stesso iter. Anzi, queste conversazioni dovrebbero avvenire prima che le nuove tecnologie siano pronte per essere usate sugli esseri umani. «Prima dell'inevitabile, sarà meglio che la società civile avvii e mantenga aperto un dibattito pubblico sulle sfide etiche della gametogenesi in vitro», hanno scritto Daley e colleghi nell'articolo di gennaio 2017. «Scienza e medicina avanzano vertiginosamente, la rapida trasformazione della medicina riproduttiva e rigenerativa potrebbe coglierci di sorpresa». ■

PER APPROFONDIRE

Derivation of Oocytes from Mouse Embryonic Stem Cells. Hübner K. e altri, in «Science», Vol. 300, pp. 1251-1256, 23 maggio 2003.

Offspring from Oocytes Derived from In Vitro Primordial Germ Cell–Like Cells in Mice. Hayashi K. e altri, in «Science», Vol. 338, pp. 971-975, 16 novembre 2012.

Reconstitution In Vitro of the Entire Cycle of the Mouse Female Germ Line. Hikabe O. e altri, in «Nature», Vol. 539, pp. 299-303, 10 novembre 2016.



Alla lavagna. Richard Feynman a lezione; oltre a essere stato uno scienziato influente, il fisico statunitense è stato anche un efficace comunicatore della scienza.

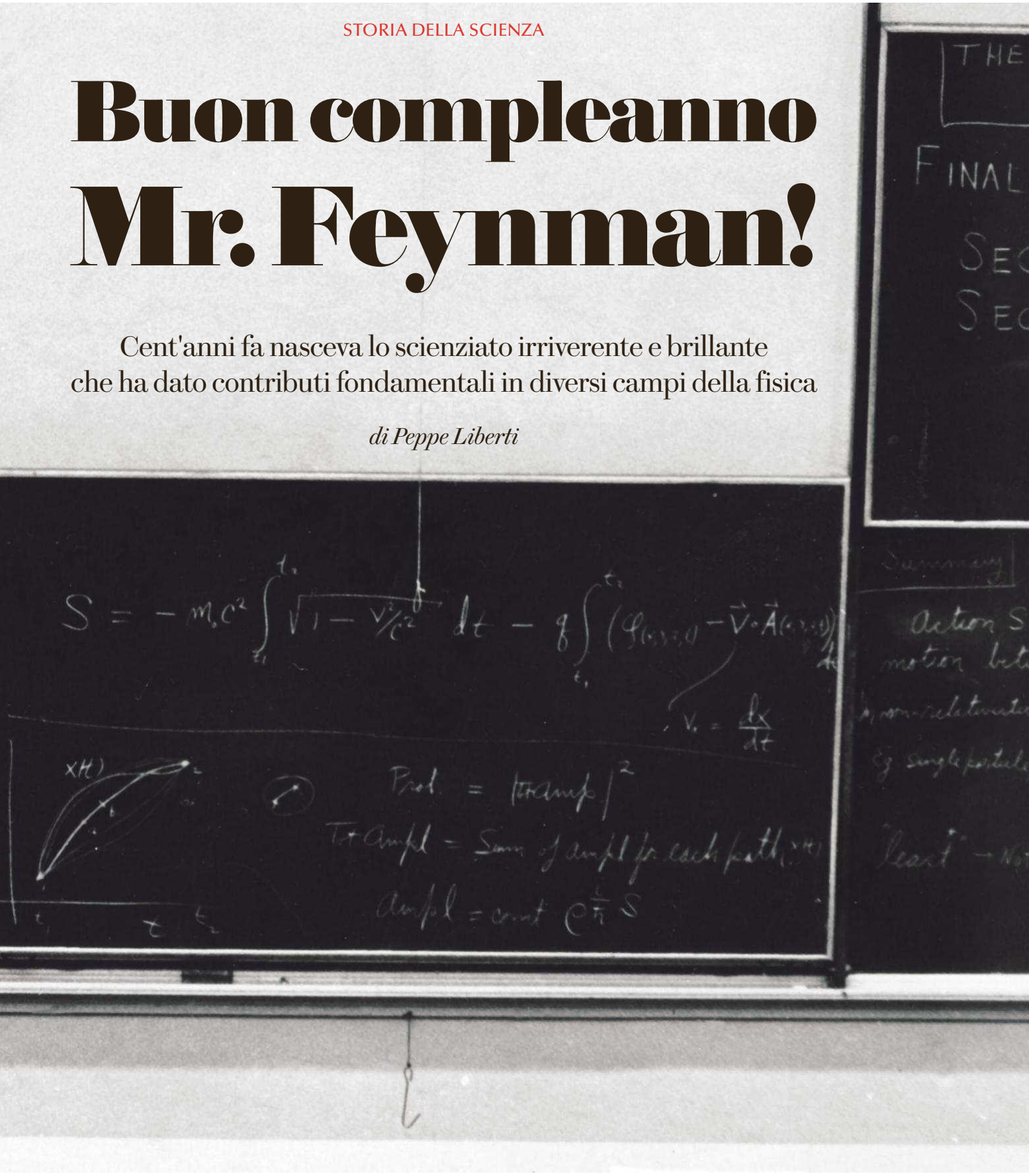
Physics Today Collection/American Institute of Physics/Science Photo Library/AGF

STORIA DELLA SCIENZA

Buon compleanno Mr. Feynman!

Cent'anni fa nasceva lo scienziato irriverente e brillante che ha dato contributi fondamentali in diversi campi della fisica

di Peppe Liberti



Peppe Liberti è dottore di ricerca in fisica. Scrive per varie testate tra cui «Le Scienze» e «Focus». È autore di *Più per meno diviso* (40k, 2013), un ebook sulla storia dei segni delle quattro operazioni fondamentali.

Ehi, chi è il tipo con i bongo? Dick Feynman. Insegna qui? Sì. È un premio Nobel? No. Non credo ci voglia cervello per saper suonare bene il bongo.

«The California Tech», 3 ottobre 1957

«Sono nato da qualche parte a New York, ma non ricordo nulla tranne Far Rockaway», ha raccontato Richard Phillips Feynman in un'intervista concessa allo storico della scienza Charles Weiner nel marzo 1966, qualche mese dopo aver ricevuto il Nobel per la fisica. Quella parte è Manhattan, dove i genitori hanno preso casa appena sposati, e il fatto accade l'11 maggio 1918, un secolo fa. Far Rockaway è un po' più a sud, adagiata sul collo della penisola di Rockaway, e da lì si scorge l'oceano. Per i newyorkesi è il luogo dove passare l'estate sperando di incontrare le dive dell'epoca, la scandalosa Mae West, per esempio, o Mary Pickford, la «fidanzatina d'America», che da quelle parti di tanto in tanto si fanno ammirare. Il giovane Richy, così lo chiamano, vi si stabilisce definitivamente all'inizio degli anni trenta. Abita «in una grande casa a due miglia dalla spiaggia» e frequenta la Far Rockaway High School, dove si mette in evidenza per la sua abilità in chimica e matematica e il disinteresse per quasi tutte le altre discipline.

Due insegnanti in particolare ne colgono le potenzialità. La prima è Lillian Moore, la professoressa di algebra, che qualcuno cita solo per il nomignolo affibbiatole dagli studenti (*Battleship*, nave da guerra) ma che andrebbe ricordata per essere stata una studiosa di questioni didattiche e autrice di una serie articoli sul tema pubblicati su «The Mathematics Teacher», la rivista del National Council of Teachers of Mathematics. L'altro è Abram Bader, il brillante professore di fisica che aveva iniziato, ma mai concluso, un dottorato alla Columbia University sotto la guida di Isidor Rabi.

IN BREVE

L'11 maggio 1918, nasceva a New York Richard Feynman, fisico statunitense, premio Nobel nel 1965 insieme a Shin'ichirō Tomonaga e Julian Schwinger per il loro lavoro sull'elettrodinamica quantistica, con profonde conseguenze per la fisica delle particelle elementari.
La sua eredità scientifica però va ben oltre le ricerche per cui ha ricevuto il Nobel. Feynman è stato uno dei fisici più brillanti e importanti del Novecento, e non di rado sulla sua figura sono stati costruiti miti non sempre corretti, che hanno offuscato i suoi contributi importanti in ambiti diversi della fisica.
Feynman è stato anche un efficace comunicatore della scienza; le sue lezioni e i suoi testi divulgativi sono ancora oggi un punto di riferimento.

In gioventù. Uno degli incontri tra gli scienziati che partecipano al Progetto Manhattan; Feynman è in camicia bianca nella seconda fila, accanto allo scienziato, Robert Oppenheimer, vestito di nero.

Los Alamos National Laboratory/Science Photo Library/AGF

CRONOLOGIA

Un Nobel e molto altro

1918 Richard P. Feynman nasce a Manhattan, New York, l'11 maggio

1935 Entra al Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston scegliendo inizialmente la matematica e in seguito la fisica come principale materia di studio

1939 Pubblica su «Physical Review» i suoi primi due lavori; consegue il Bachelor of Sciences al MIT; viene ammesso come studente di dottorato a Princeton dove è anche assistente di John Wheeler

1942 Completa la tesi di dottorato dal titolo *The principle of least action in quantum mechanics* e a giugno ottiene il PhD in fisica

1943 Si trasferisce a Los Alamos per lavorare al Progetto Manhattan

1945 Prende servizio a Cornell come professore

1918 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946

Bader, che è l'unico docente di quel periodo che Feynman cita in libri e interviste, conquista l'allievo prestandogli un libro di calcolo avanzato e svelandogli come ricavare la traiettoria percorsa da un corpo in movimento sfruttando i buoni uffici di un principio che, da quel momento, diventa il suo gioco preferito: il principio di minima azione (*si veda il box a p. 56*).

La difficoltà con le discipline umanistiche torna prepotente durante gli studi al Massachusetts Institute of Technology (MIT), dove nel giugno 1939 guadagna il titolo di *Bachelor in Science*, ed è poi certificata nel giudizio del Comitato di ammissione agli studi di dottorato alla Princeton University: «Questo tizio del MIT: guardate le sue valutazioni attitudinali in matematica e fisica. Fantastico! Nessun altro che si è candidato qui a Princeton si avvicina così tanto al vertice assoluto. Deve essere un diamante grezzo. Non abbiamo mai fatto entrare nessuno con punteggi così bassi in storia e in inglese». In un'intervista alla BBC, nel 1981, per il programma *Horizon: The Pleasure of Finding Things Out*, Feynman confessa il suo presunto limite, ma non se ne compiace: «Non avevo tempo per imparare e non avevo molta pazienza per quelle che sono chiamate le scienze umane. (...) Ho un'intelligenza limitata e l'ho usata in una particolare direzione».

Questo sbandierato cattivo rapporto con le *humanities,* in particolare con la filosofia, soprattutto se applicata alla scienza, ha alimentato qualche leggenda. Una è l'avergli attribuito la frase: «La filosofia della scienza è utile agli scienziati più o meno quanto l'ornitologia lo è agli uccelli». Quel che Feynman ha sostenuto è semmai che la filosofia della scienza è «una malattia tipica della mezza età» di cui lui stesso ha sofferto, ma una delle prime regole nella costruzione di un mito, si sa, è fargli dire cose che non ha mai detto.

Far di conto

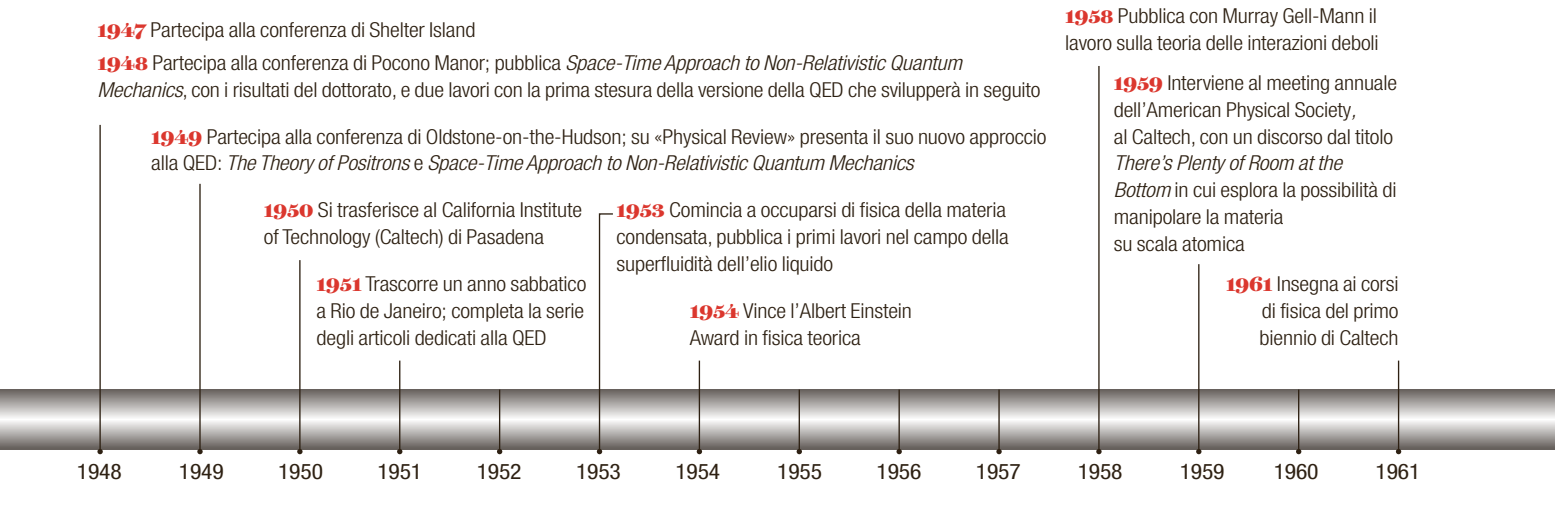
Feynman arriva a Princeton nel 1939, e lì ha la fortuna di assistere nella ricerca e nell'insegnamento – e la lungimiranza di scegliere come relatore di tesi – il giovane John Archibald Wheeler, un fisico audace e fantasioso che ama giocare con i concetti e le parole che li esprimono. A lui si dovrà la diffusione del termine «buco nero» e sarà lui a dare il nome di *wormhole* (letteralmente «buco di verme») ai cunicoli nella geometria dello spazio-tempo (quelli che gli autori di fantascienza immaginano come le vie per accedere in maniera pressoché immediata a un altro universo o a regioni distanti dello stesso universo) o a coniare lo slogan *It from bit* per dire in tre parole che l'informazione, di cui il bit è l'unità elementare, è il mattone su cui si fonda l'universo.

Così, quando il suo allievo mette a punto il metodo che permette di determinare il ruolo che ha l'azione in meccanica quantistica, scoprendo che alla propagazione di una particella contribuisce una molteplicità di traiettorie e non più solo una (*si veda il box a p. 57*), come invece accade in fisica classica, ritiene che «somma sulle storie» sia il nome giusto da assegnargli. Ne è entusiasta al punto da ritenere chiusa la partita con Albert Einstein, da qualche tempo assai critico nei confronti della teoria dei quanti. Quando Wheeler si reca a casa sua, al 112 di Mercer Street, per informarlo della straordinaria scoperta riceve però in risposta il solito ritornello su Dio che non gioca a dadi seguito dalla postilla: «Forse mi sono guadagnato il diritto di commettere i miei errori».

Feynman è ancora giovane ma tra i due è quello coi piedi meglio piantati in terra, meticoloso nei calcoli, pratico. Tutto quello che contribuirà ad alimentare il mito del «mezzo genio e mezzo buffone» (come lo definirà il fisico e matematico britannico Freeman Dyson dopo averlo conosciuto) è solo la momentanea e necessaria distrazione da quello che gli interessa davvero: risolvere le difficoltà matematiche dei problemi fisici che gli si parano innanzi («Una goduria!», scrive alla madre appena arrivato a Princeton). Gian Francesco Giudice, direttore del Dipartimento di fisica teorica del CERN, sottolinea: «Nonostante il suo carattere impetuoso e il suo spirito individualista, in fisica non era un "rivoluzionario". Al contrario, lo definirei un "conservatore estremista". Mentre Einstein creava rivoluzionarie teorie in completa rottura con la tradizione, Feynman partiva da idee preesistenti per interpretarle sotto una prospettiva nuova, inventando un linguaggio personale che gli permetteva di arrivare alle più estreme conseguenze».

Il suo approccio alla teoria quantistica, argomento della tesi di dottorato che viene discussa a Princeton il 3 giugno 1942, è forse l'esempio più emblematico di questa attitudine. Gli sviluppi che stanno per arrivare porteranno a conseguenze inattese, e a una vera e propria rivoluzione nei segni della fisica. Prima però c'è da lavorare al progetto nucleare statunitense e partire alla volta di Los Alamos, in New Mexico, dove ha l'occasione di incontrare alcuni tra i maggiori fisici dell'epoca e confrontarsi con loro.

Nel 1942 viene istituito il Progetto Manhattan, il programma segreto che mira alla costruzione della bomba atomica. Los Alamos è una delle tre località dove viene svolto il lavoro (le altre so-



no Oak Ridge, in Tennessee, e Hanford, nello Stato di Washington) e lì Feynman, che si occupa delle cose più varie, vi ambienterà le sue storie più celebri e folli, quasi a voler costruire un muro di riserbo e difesa rispetto a una vicenda in cui, come ha detto Robert Oppenheimer, all'epoca direttore del laboratorio di Los Alamos, «i fisici hanno conosciuto il peccato». Oppenheimer, che lo vorrebbe con sé a Berkeley, lo definisce «uno dei giovani fisici più brillanti che ci sono qui [...] estremamente chiaro, estremamente normale da tutti i punti di vista e un eccellente insegnante». Hans Bethe, con il quale stabilisce un rapporto di amicizia, la pensa allo stesso modo, e riesce a portarselo alla Cornell University a Ithaca, nel cuore dello Stato di New York, dove Feynman prende servizio alla fine del 1945 e dove rimarrà per cinque anni.

Gli anni di Cornell si riveleranno cruciali e saranno quelli in cui, nelle Conferenze di Shelter Island del 1947, di Pocono Manor del 1948 e di Oldstone-on-the-Hudson del 1949, l'elettrodinamica quantistica, «la strana teoria della luce e degli elettroni» (*si veda il box a p. 58*), passa dalla versione generale, completa ma poco maneggevole, del teorico statunitense Julian Schwinger a quella di Feynman, basata sull'estensione al caso relativistico, cioè alle particelle che percorrono lo spazio-tempo, del metodo sviluppato a Princeton e che ormai è per tutti, e malgrado le «storie» di Wheeler, il metodo dell'integrale sui cammini. A dimostrare l'equivalenza tra le trattazioni di Schwinger e Feynman (e del fisico giapponese Tomonaga) ci pensa Freeman Dyson, che mostra anche come la teoria di Feynman conduce in maniera naturale a un metodo di calcolo molto semplice, basato su una sorprendente e illuminante rappresentazione visiva dei processi di interazione tra luce ed elettroni. I grafi di Dyson (lui all'inizio li chiama così) cioè i diagrammi di Feynman (*si veda il box a p. 59*), dirà Schwinger, sono quelli che «portano i calcoli alle masse». Come ha ricordato Dyson in un'intervista pubblicata su «Nautilus» nel 2016: «Feynman aveva queste piccole immagini nella sua testa, le scarabocchiava su carta e nessuno capiva che cosa volessero dire. Il mio compito era tradurlo in una lingua che altre persone potessero capire».

I diagrammi di Feynman «sono uno strumento ormai indispensabile nello studio dei processi quantistici che coinvolgono particelle elementari», sottolinea Gabriele Veneziano, tra i massimi fisici teorici al mondo, uno dei pionieri della teoria delle stringhe, che tenta di riconciliare la relatività generale di Einstein con la meccanica quantistica. «Anche se, in linea di principio, se ne potrebbe fare a meno, associare grafici di chiara interpretazione fisica a complicate formule matematiche ha un valore pratico inestimabile. Il loro uso, purtroppo, si limita allo studio di interazioni sufficientemente deboli per le quali un numero relativamente piccolo di diagrammi fornisce già un risultato accurato». E aggiunge: «L'integrale sui cammini (oggetto più delicato da gestire matematicamente) si applica invece a situazioni del tutto generali, dunque anche al caso di sistemi fortemente interagenti. Ha permesso inoltre sviluppi teorici importantissimi; basti pensare alla descrizione di fenomeni di tunnel quantistico o alla risoluzione numerica di teorie di campi su un reticolo. Anche in questo caso Feynman è riuscito a dare un'interpretazione affascinante e intuitiva alle regole matematiche e astratte della formulazione tradizionale della meccanica quantistica».

L'AZIONE IN FISICA CLASSICA

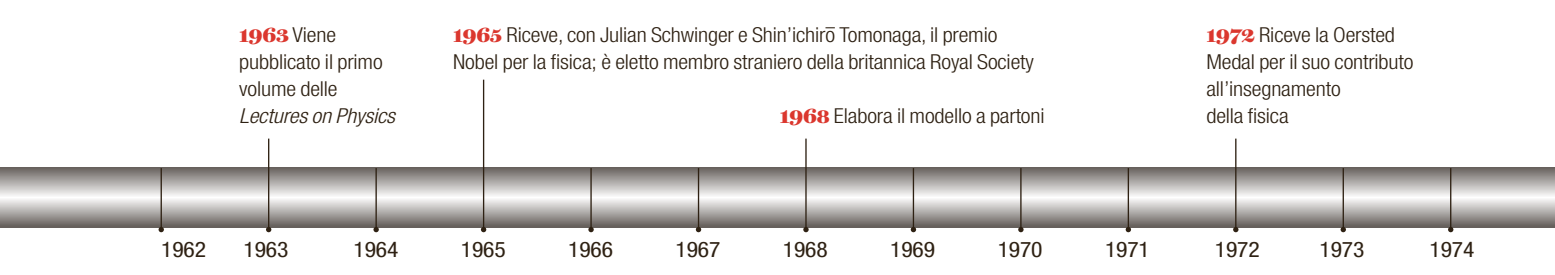
Con il minimo sforzo

Un sasso lanciato segue una traiettoria che dipende dalla competizione tra energia cinetica, che deriva dal suo movimento, ed energia potenziale, che considera l'interazione con tutto ciò che lo circonda. Questa traiettoria è l'unica possibile, a partire dalle condizioni date, l'unica che rende minima l'azione, una grandezza fisica con dimensioni di un'energia per un tempo. In fisica classica, rendere minima l'azione significa ricavare le equazioni che descrivono il moto di un sistema.
Nel XVIII e XIX secolo si attribuiva a questo comportamento un valore finalistico, come se la natura «scegliesse» la via che richiede il minimo «sforzo». Fermat lo sosteneva per la luce, che obbedisce a un sottoprincipio detto di minimo (o minor) tempo: i raggi luminosi percorrono sempre il percorso più breve (non necessariamente più corto) tra due punti. Per una particella il cammino più breve è anche il più corto, una retta, solo in assenza di interazioni che variano la sua velocità.

I maghi non possono essere compresi

Feynman prende servizio al California Institute of Technology (Caltech) di Pasadena nel 1950, quando è ormai una stella di prima grandezza nel firmamento della fisica. Il lavoro che lo porterà al Nobel è compiuto, manca solo qualche dettaglio matematico ma sarà presto pubblicato. Tra aprile e maggio del 1951, prima di passare un anno sabbatico in Brasile, insegnando fisica all'Università di Rio de Janeiro e ricevendo in cambio lezioni di samba e *frigideira*, trova il tempo di farsi conoscere meglio da chi frequenta il campus illustrando il suo approccio alla meccanica quantistica in un seminario e quello agli schemi ritmici, deliziando le orecchie di 20 «fortunati studenti» con un breve concerto di tamburi in quello che risulterà uno dei migliori *faculty fireside* dell'anno (fireside è il focolare, si tratta di incontri informali tra docenti e studenti per conoscersi meglio). Entrambe le notizie vengono pubblicate su «The California Tech» (o, informalmente, «The Tech»), il giornale gestito dall'associazione studentesca del Caltech.

Al ritorno dal Brasile e fino al 1958 il suo sguardo è rivolto prima alla fisica della materia condensata e poi alla teoria delle interazioni deboli, di cui è nota la versione elaborata da Enrico Fermi vent'anni prima che spiega l'emissione dei «raggi beta» (chiamati così prima che se ne scoprisse la vera natura, ossia elettroni) dai nuclei. Il metodo dell'integrale sui cammini diventa lo strumento per indagare la superfluidità dell'elio liquido (il fatto che l'elio li-



L'AZIONE IN FISICA QUANTISTICA

Una somma di storie

Se «classicamente» la traiettoria concessa è solo una, nel mondo quantistico quest'obbligo non esiste più e tutti i cammini, o le «storie», possibili contribuiscono a determinare ciò che accade a una particella quando si propaga tra due punti dello spazio-tempo.
In meccanica quantistica l'azione mantiene un ruolo fondamentale ma l'informazione ottenibile sull'evoluzione del sistema diventa di tipo probabilistico. Lo strumento matematico principe della nuova formulazione, che solo Wheeler chiama «somma sulle storie», prende il nome di «integrale sui cammini». Il punto di vista di Feynman è alternativo ed equivalente alle altre due versioni della meccanica quantistica (non relativistica) considerate: quella di Erwin Schrödinger, in cui la propagazione di una particella è governata da una particolare equazione d'onda (l'equazione di Schrödinger), e quella, più astratta e per questo meno usata, di Werner Heisenberg.

Doppio Nobel. Feynman (*a destra*) e il fisico britannico Paul Dirac, Nobel nel 1933, noto tra l'altro per aver previsto l'esistenza delle particelle di antimateria. La foto è stata scattata nel 1962.

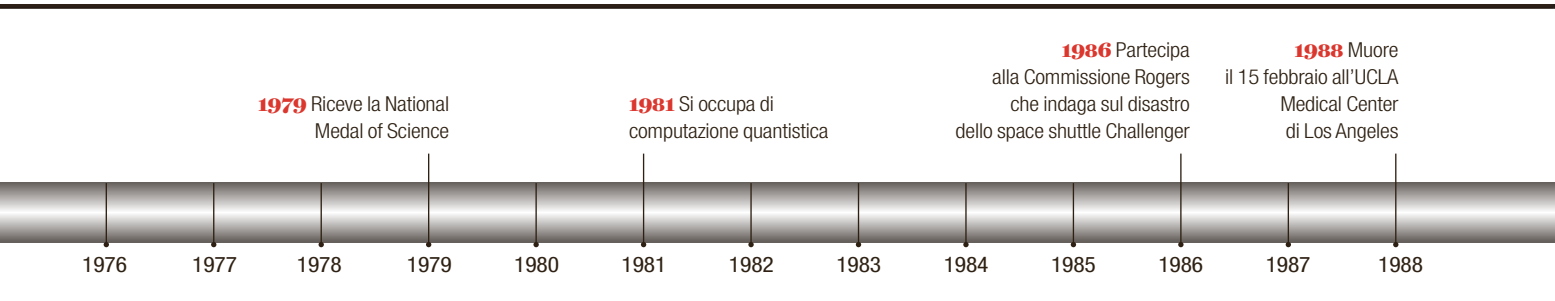
Physics Today Collection/American Institute of Physics/Science Photo Library/AGF

quido fluisce senza resistenza quando è raffreddato al di sotto di una certa temperatura e a cui dedica 10 dei 14 lavori pubblicati in questo periodo), la superconduttività (il fatto che in alcuni metalli la resistenza elettrica tende ad annullarsi scendendo sotto una certa temperatura), e il *polaron problem,* il fenomeno della distorsione di un reticolo cristallino dovuta alla propagazione lenta di un elettrone al suo interno. Nel caso delle interazioni deboli, Feynman prova «il piacere di scoprire una nuova legge» (un po' più generale di quella di Fermi), firmando un articolo con lo statunitense Murray Gell-Mann, che quel piacere l'aveva provato anche lui, per la stessa legge, nello stesso periodo e per i fatti suoi.

Nel dicembre 1952, quasi preannunciando la svolta nei suoi interessi di ricerca, si esibisce in un seminario dal titolo *Atomi in moto*, che è il titolo del primo capitolo del primo volume delle *Lectures on Physics* (pubblicato nel 1963). Il 3 aprile 1953, invece, in quella che ora si chiama Feynman Lecture Hall, illustra agli ex studenti e alle loro famiglie il principio di minimo tempo (che occuperà il capitolo 26 del primo volume delle *Lectures*). Il seminario ha per titolo *Light: the time miser* e si concentra sul ruolo del «più astuto tra tutti i "risparmiatori di tempo"», la luce, appunto, i cui raggi percorrono sempre il percorso più breve (ma non necessariamente più corto) tra due punti. Altri seminari seguiranno, alcuni nella stessa aula e sempre in occasione degli *Alumni-day.* Come testimoniano le foto, in queste occasioni Feynman pare a suo agio e intrattiene un pubblico attento e divertito.

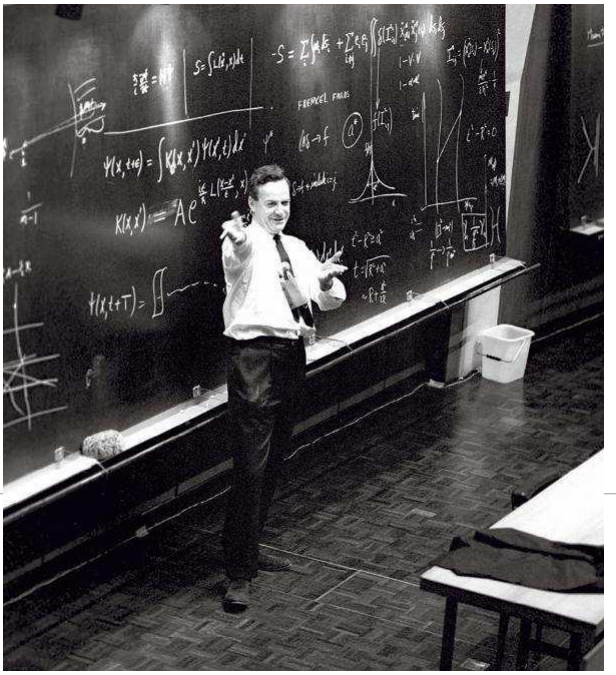
Il 1959 è l'anno dell'intervento all'incontro annuale dell'American Physical Society, sempre al Caltech, dal titolo *There's Plenty of Room at the Bottom* (C'è un sacco di spazio laggiù in fondo), in cui invita i colleghi ad avviare un nuovo campo di ricerca, quello che ora chiamiamo nanotecnologia. All'epoca nessuno raccoglie la sfida, a parte la comunità degli inventori dei motori in miniatura che lo cingono d'assedio nella speranza di vincere i 1000 dollari che ha messo in palio per chi fosse stato in grado di costruire un micromotore elettrico rotante. Il premio lo vince un ingegnere di Pasadena, William McLellan, che guadagnerà così il suo quarto d'ora di celebrità. La cronaca dell'incontro tra Feynman e McLellan è riportata sul numero di dicembre 1960 di «Engineering and Science», la rivista che ora prende il nome di «Caltech Magazine» e che, a partire dal 1956, pubblica alcune tra le cose più note ai cultori di Feynman (per esempio lo stesso *There's Plenty of Room at the Bottom* e, nel 1974, la celeberrima *Cargo Cult Science*).

Quando al Caltech decidono che è arrivato il momento di aggiornare il contenuto dei corsi di fisica del primo biennio, affidare il lavoro a Feynman appare la scelta naturale. Il 21 settembre 1961 «The California Tech» può avvisare che «la fisica per le matricole è stata rinnovata»: c'è un nuovo corso, «più aggiornato e più interessante di quanto non sia mai stato». Le lezioni, a cui partecipano anche dottorandi e docenti, non lasciano indifferente nessuno: c'è chi le considera geniali, chi terribili. La polemica esplode proprio su quel giornale con la pubblicazione, il 3 ottobre 1963, di un



L'elettrodinamica quantistica

L'elettrodinamica quantistica (o QED) descrive l'interazione tra materia e radiazione elettromagnetica in un contesto in cui le regole della meccanica quantistica si combinano con quelle della relatività speciale. Nella QED, come in tutte le teorie di campo quantistiche, il ruolo da protagonista è svolto, appunto, dal campo, una grandezza fisica che non è più solo una funzione della posizione nello spazio e del tempo (come il campo gravitazionale) o, nel caso relativistico, dello spazio-tempo, ma un oggetto fisico in grado di creare o distruggere particelle in ogni punto dello spazio-tempo.
Il campo elettromagnetico partecipa ai processi di interazione manifestandosi come una particella, il fotone, e un elettrone non è che la manifestazione, in quegli stessi processi, di un altro campo. Il principale contributo di Feynman alla QED è stato riformularla in maniera sistematica estendendo al caso relativistico il suo precedente lavoro sull'azione in meccanica quantistica. Feynman ha lo strumento naturale (l'integrale di cammino) per calcolare, anche se in maniera approssimata, le probabilità di tutti i processi fisici permessi dalla QED.



In Svizzera. Richard Feynman al CERN di Ginevra nel 1965, durante una lezione magistrale successiva al conferimento del Nobel per la fisica in quello stesso anno.

editoriale dal titolo che fa il verso al cognome del contestato professore, *Well, He's A Fine Man,* in cui i caporedattori J.C. Simpson e Don Green riportano l'enorme insoddisfazione degli studenti sul corso e quella del dipartimento sugli studenti e richiedono, per risolvere la situazione, l'intervento del comitato per le politiche educative. Robert Leighton, che con Matthew Sands aveva registrato e trascritto tutte le lezioni, replica subito. Riconosce che una revisione così radicale (e sperimentale) dei corsi può aver creato problemi, ma ne indica il principale nel tempo, eccessivo a suo parere, impiegato nella preparazione delle dispense. Non è una risposta che soddisfa i critici, e le polemiche tra questi e chi invece non trova motivi per lamentarsi proseguiranno sul giornale almeno fino al 1965, anno della pubblicazione del terzo volume delle *Lectures* e del conferimento del Nobel.

Uno dei ritratti riproposti tutte le volte che si racconta Feynman è quello tracciato da Mark Kac, matematico polacco che con lui condivide una celebre formula. Kac afferma come egli non fosse un genio ordinario ma «un mago di altissimo calibro» e che i maghi «raramente, o forse mai, hanno allievi, perché non possono essere emulati». In *The Beat of a Different Drum* Jagdish Mehra, uno tra i più importanti storici della fisica moderna, riporta le parole di uno dei suoi studenti di dottorato, Philip Platzman, che suonano come una sinistra conferma dei presunti limiti didattici del nostro («non ne ha avuti molti perché con loro era in difficoltà, perché non se ne preoccupava davvero»). A volte i pezzetti di mito si creano così, non cercando le informazioni nei posti giusti e crogiolandosi alla luce di una frase ben riuscita.

In realtà si tratta di una leggenda come tante, ma rimasta incredibilmente tale fino alla pubblicazione su «Physics Today», a maggio dello scorso anno, di una ricerca effettuata dal matematico amatoriale Thomas Van Kortryk (aggiornata dallo stesso autore a gennaio 2018) in cui è riportata la lista degli studenti di dottorato seguiti da Feynman a partire dai tempi di Cornell. Van Kortryk, ma lo avrebbe potuto fare chiunque, ne ha scovati 34, a cui ne vanno aggiunti ancora due appena spuntati dagli archivi del Caltech (Carl Wilhelm Helstrom, dottorato nel 1951 e Howard Murray Robbins, nel 1952). Dunque, a partire dal 1951 e fino al 1978 Feynman è relatore o correlatore di 35 tesi di dottorato e poi, nel 1987, di un'altra ancora, con John Preskill come correlatore. Quello che Van Kortryk non fa notare è che l'interruzione del 1978 avviene proprio in coincidenza con l'inizio della battaglia contro il tumore che lo tormenterà nei dieci anni a venire.

Il piacere di capire

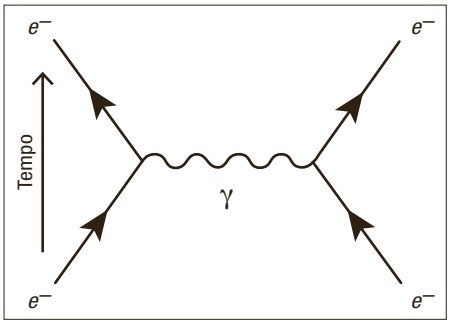
La *Nobel Lecture* che Feynman tiene l'11 dicembre 1965 all'Accademia reale svedese delle scienze a Stoccolma è la ricostruzione del percorso che dall'incontro con Wheeler del 1939 lo ha portato alla «visione spazio-temporale dell'elettrodinamica quantistica». Il discorso è la realizzazione pratica dell'idea che ha Feynman della comunicazione scientifica: al centro del racconto c'è il processo, non il risultato finale impresso sulle pagine delle riviste specializzate e ripulito dal carico di errori e pregiudizi incontrati lungo la via. Vanno conosciuti anche quelli, e la propria personale relazione con l'oggetto di studio. Sì, anche gli aneddoti vanno bene, quelli il cui uso eccessivo Gell-Mann spesso gli rinfaccia.

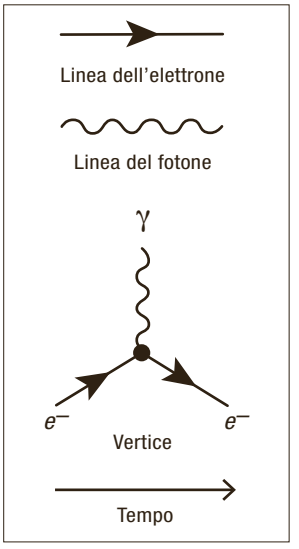
Il Nobel potenzia l'aura di Feynman nel mondo della fisica ma al di fuori il suo non è ancora un nome familiare. Negli anni che seguono, mentre fa incetta di riconoscimenti, rivolge il suo sguardo al mondo subatomico e si fa promotore di un modello che riesce a rendere più comprensibili, almeno rispetto al barocco formalismo dell'epoca, alcuni aspetti delle interazioni ad alta energia tra gli elettroni e i nucleoni (le particelle che compongono il nucleo atomico, cioè protoni e neutroni). L'ipotesi che fa nel 1968 è che quando un nucleone si muove a una velocità vicina a quella della luce si comporta come un oggetto composto da unità puntiformi

Cern/Science Photo Library/AGF

I diagrammi di Feynman

I diagrammi nascono come un metodo grafico per visualizzare e calcolare gli effetti dell'interazione elettromagnetica tra particelle cariche. Sono costituiti da pochissimi ingredienti di base: linee, che rappresentano particelle, e vertici, i «luoghi» in cui le particelle sono create o distrutte. Una linea dritta con una freccia il cui verso è concorde con quello dell'avanzare del tempo rappresenta un elettrone (e^-), se invece il verso è opposto all'avanzare del tempo, la particella rappresentata è un positrone (e^+, stessa massa ma carica opposta a quella dell'elettrone). Una linea ondulata rappresenta un fotone (γ), il quanto del campo elettromagnetico. Nella QED c'è un solo vertice possibile, quello che accoppia il fotone a una particella carica (elettrone o positrone) con un'intensità proporzionale alla carica.
Linee e vertici sono associati ognuno a una precisa espressione matematica e si combinano secondo l'ordine dettato dal diagramma. Il più semplice tra questi è quello che coinvolge due vertici come quello che rappresenta l'interazione tra due elettroni con l'emissione e l'assorbimento di un fotone.





che chiama «partoni». Che gli adroni (la famiglia di particelle subatomiche di cui fanno parte i nucleoni) non siano oggetti elementari ma composti – da *quark* per Gell-Mann o da *ace* per George Zweig (che ha Feynman come relatore di tesi di dottorato) – si sa già dal 1964, ma il modello di Feynman porta ancora una volta «i calcoli alle masse».

«Si spingeva a esplorare gli aspetti più reconditi e astratti della natura restando sempre ben ancorato alla realtà fisica. Non era trascinato dall'ambizione per la scoperta, ma dal puro piacere di capire, di risolvere un problema, di calcolare la soluzione, di mettere alla prova la sua leggendaria intuizione fisica», evidenzia Giudice. Per Veneziano «è naturale paragonarlo a Enrico Fermi, anche lui un genio che ha attraversato settori molto diversi della fisica. Fermi è stato un grande fisico sperimentale, oltre che un teorico, una figura di scienziato che non si è più ripetuta in fisica delle particelle elementari, ormai troppo specializzata. Feynman, al contrario, è stato un puro fisico teorico dalle intuizioni favolose che situerei, in qualche modo, a metà strada fra Fermi ed Einstein». Giudice lo descrive così: «Geniale, estroverso, irriverente verso ogni forma di autorità, Feynman ha riscritto il cammino della fisica teorica e per noi fisici del terzo millennio incarna l'essenza delle doti ineffabili del fisico teorico: un vero e proprio personaggio mitico».

Feynman diventa «ufficialmente famoso» tardi nella sua vita. Accade in seguito alla partecipazione ai lavori della Commissione Rogers, incaricata di indagare sulle cause del disastro dello space shuttle *Challenger*, distrutto nei cieli della Florida il 28 gennaio 1986 a soli 73 secondi dal lancio. Il 9 febbraio, durante i lavori della commissione e davanti a un buon numero di giornalisti armati di taccuini e telecamere, infila una guarnizione di gomma in un bicchiere di acqua ghiacciata e mostra qual è, a suo parere, la ragione dell'incidente: a causa della bassa temperatura, la mattina del lancio, la gomma delle guarnizioni usate per sigillare i segmenti dei razzi a combustibile solido che spingono lo shuttle durante il decollo aveva perso elasticità e non era stata più in grado di sigillare alcunché. «Il pubblico ha potuto vedere con i suoi occhi come viene fatta la scienza, come un grande scienziato pensa con le sue mani, come la natura dia una risposta chiara quando uno scienziato le fa una domanda chiara», affermerà Freeman Dyson. Il «New York Times» dà risalto alla tesi di Feynman e lo segue fino al Caltech, dove a giugno presenta la relazione di minoranza che di lì a poco sarebbe stata pubblicata come appendice al documento ufficiale della commissione. I funzionari della NASA, nel credere che la navetta fosse sicura e la probabilità di una catastrofe bassa, dichiara, «hanno ingannato se stessi». La «stampa profana» (come la chiamava Einstein) può cominciare a dipingere l'icona; ma l'icona non ha più le forze per dar retta alle cose che contano poco. Nel numero di settembre 1986 di «The Tech», nel vocabolario dedicato al gergo del Caltech sarà l'unico citato sia «come uomo» («simile a Dio ma più amichevole») sia «come libro» («simile alla Bibbia ma fa osservazioni più esorbitanti»).

Nato un secolo fa «da qualche parte a New York», Feynman muore trent'anni fa a Los Angeles. Poche ore dopo che la notizia diventa di dominio pubblico, una coppia di studenti si arrampica in cima all'edificio che ospita la Millikan Library al Caltech e appende uno striscione dove c'è scritto in grande, affinché lo possano vedere tutti: «WE LOVE YOU, DICK!». Forse ricordavano l'episodio di tanti anni prima, di quella volta che uno striscione era stato fissato in cima alla Throop Hall per festeggiare il Nobel. C'era scritto «WIN BIG, RF». E lui aveva gradito moltissimo. Sì, Richard Feynman, quella volta lì, ha vinto alla grande. ■

PER APPROFONDIRE

Genio. La vita e la scienza di Richard Feynman. Gleick J., Garzanti, Milano, 1994.

The Beat of a Different Drum: Life and Science of Richard P. Feynman. Mehra J., Oxford University Press, New York, 1994.

QED and the Men Who Made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga. Schweber S.S., Princeton University Press, Princeton,1994.

The Quantum Labyrinth: How Richard Feynman and John Wheeler Revolutionized Time and Reality. Halpern P., Basic Books, New York, 2017.

My Life with the Physics Dream Team: Freeman Dyson on Working with the Greatest Physicists of the 20th Century. Paulson S., in «Nautilus», n.43, pubblicato on line, 8 dicembre 2016. **http://nautil.us/issue/43/heroes/my-life-with-the-physics-dream-team.**

L'archivio on line con tutti i numeri del «The California Tech»: **http://caltechcampuspubs.library.caltech.edu/view/publication/California_Tech.html.**

Organo delicato. Il fegato umano è composto da circa 200 miliardi di cellule, e il suo cattivo funzionamento o eventuali lesioni possono portare a malattie anche mortali.

Terapie cellulari innovative potrebbero guarire questo organo eliminando la necessità di ricorrere a procedure complesse e rischiose

di Roberto Gramignoli

Cellule nuove per il fegato

Roberto Gramignoli, è assistente professore al Karolinska Institutet a Stoccolma. Si occupa di terapie cellulari per il trattamento di malattie del metabolismo e patologie fulminanti. Oltre al trapianto di epatociti porta avanti studi preclinici innovativi mirati a realizzare il primo trapianto senza immunosoppressione usando staminali della placenta.

«Era come trovarsi avvolti in una nebbia, come se la mia testa, il mio cervello fosse offuscato, immerso in una coltre di cui nemmeno avevo coscienza. Mentre ora tutto appare così nitido e chiaro. È una sensazione bellissima, mai provata prima e che non credevo possibile». I pazienti ci sorprendono quotidianamente con semplici parole come queste. Pochi giorni dopo aver ricevuto un trapianto di cellule di fegato, una nostra paziente si è rivolta così al medico che l'aveva in cura. Grazie a questo trapianto abbiamo curato una sindrome che ha un ruolo centrale nel metabolismo umano e che ha origine proprio in quell'organo.

In laboratorio passiamo le giornate a studiare i meccanismi molecolari e cellulari che ci permettono di curare malattie del fegato complesse e spesso letali mediante terapie cellulari, quando poi siamo sorpresi da aspetti ben più grandi. Ci stupiamo della naturale gioia provata da bambini affetti da malattie invalidanti nel vedere per la prima volta il mare, o per il primo giorno passato a scuola come uno studente tra tanti.

Da più di vent'anni trapiantiamo cellule del fegato, o epatociti. Abbiamo imparato che possiamo trattare malattie innescate da infezioni virali, overdose di farmaci o deficienze del metabolismo. Abbiamo trattato difetti del metabolismo generati dalla mancanza di un enzima nelle cellule del fegato del paziente, che di frequente porta a insufficienze e ritardi dello sviluppo o a problemi cognitivi, se non a sintomi più gravi e a volte letali.

Curare malattie metaboliche è spesso difficile, a volte impossibile. Hanno un'origine genetica, in cui il difetto si manifesta di frequente fin dai primi giorni di vita. Farmaci e diete selettive rallentano o impediscono, quando è possibile, l'aggravarsi della malattia. Ma con il passare degli anni molte di queste malattie diventano sempre più gravi, limitando le possibilità di avere una vita normale o addirittura una semplice buona qualità di vita. Dato che hanno basi genetiche, le possiamo trattare solo sostituendo le cellule «difettose»: gli epatociti incapaci di svolgere la funzione vitale. Per decenni questa sostituzione è avvenuta mediante l'asportazione chirurgica del fegato e la sua sostituzione con un organo funzionante. Oggi questa sostituzione può avvenire in maniera più puntuale, con l'infusione di cellule funzionanti prelevate da un donatore (il fegato è composto da 150-200 miliardi di cellule).

Il trapianto è un complesso intervento chirurgico che ha richiesto decenni per giungere ai livelli di eccellenza odierni. Ancora oggi nella maggioranza dei casi è l'unica terapia per ripristinare funzioni vitali di fegati compromessi. Lo scorso anno, proprio nel cinquantesimo anniversario del primo trapianto effettuato con successo, si è spento l'artefice di questa innovazione terapeutica, il chirurgo statunitense Thomas Starzl. Verrà ricordato per aver introdotto nei primi anni sessanta una realtà terapeutica il cui grado di successo (la percentuale di sopravvivenza dei pazienti successiva al trapianto) si attesta oggi attorno al 70-80 per cento.

Nei decenni successivi ai primi trapianti di fegato sono stati introdotti progressi e migliorie a livello chirurgico e ancora di più a livello farmacologico, con protocolli sempre più efficaci per diminuire le possibilità di un rigetto. Tuttavia gli effetti collaterali dei farmaci usati o la loro interazione con altri medicinali sono problemi non ancora risolti e possono sfociare in complicanze gravi o invalidanti. Nuovi progressi nel campo della medicina rigenerativa aprono uno spiraglio a interessanti prospettive. Di recente si è iniziato a guardare alle terapie a base di cellule con maggior competenza, riconoscendo il potenziale che cellule funzionanti possono avere in casi come questi, portando a un cambiamento di paradigma nella medicina.

Un altro trapianto

Più di quarant'anni di ricerca hanno dimostrato che molteplici malattie del fegato possono essere trattate con il trapianto di epatociti. Il fegato non è rimosso dal paziente, ma nell'organo si inseriscono cellule mature e funzionanti per correggere una malattia.

IN BREVE

Da oltre vent'anni malattie che hanno origine da danni al fegato o da un suo malfunzionamento sono curate con un trapianto di cellule del fegato, gli epatociti; è un'opzione che accompagna o sostituisce il trapianto dell'organo.
Il trattamento con epatociti, però, è limitato solo a pochi centri, a causa della complessa procedura di isolamento, dei problemi che riguardano la sopravvivenza a lungo termine di queste cellule e della disponibilità di fegati donatori adatti.
Un'opzione terapeutica innovativa potrebbe venire dalle cellule epiteliali dell'amnios della placenta, caratterizzate da una potente staminalità, cioè dalla capacità di differenziarsi nelle diverse tipologie cellulari che formano un organismo adulto. L'uso di queste cellule supera ostacoli importanti delle altre opzioni terapeutiche.

Mehau Kulyk/Science Photo Library/AGF (*pagine precedenti*)

L'isolamento degli epatociti

I primi tentativi di isolamento di epatociti sono stati effettuati su animali da laboratorio (ratti e topi, per lo più) quasi cinquant'anni fa. Tuttavia solo in anni recenti siamo riusciti ad adattare e a rendere efficace questa procedura anche ai tessuti umani, affinché si possa usare in ambito clinico.
Gli epatociti sono isolati da tessuti epatici (generalmente fegati esclusi da trapianto) mediante una delicata procedura chirurgica unita a una specifica azione digestiva a carico di enzimi (nello specifico, collagenasi e proteasi):

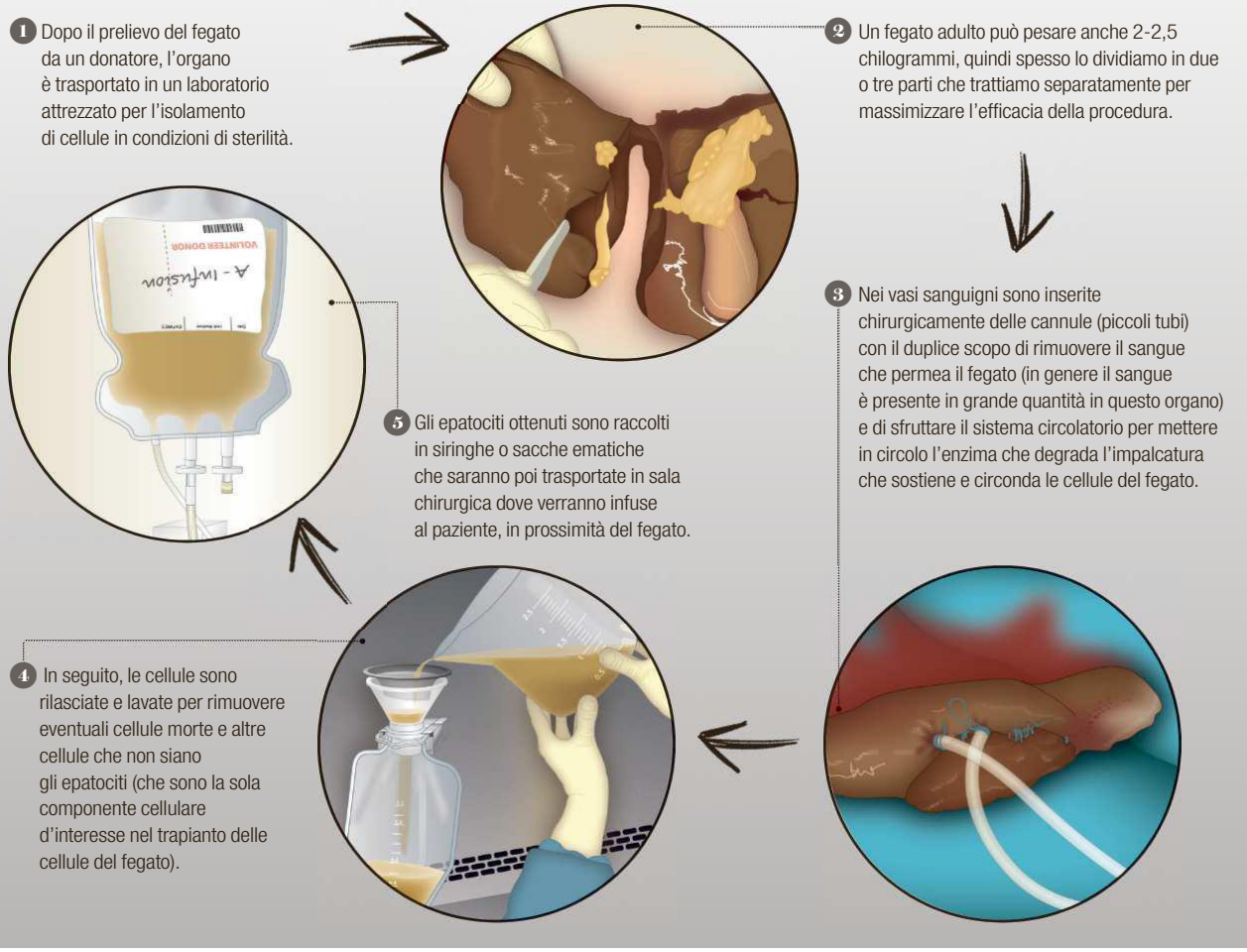


Illustrazione di Marco Marzola

Oggi il trapianto di epatociti è un approccio a sostegno o alternativo al trapianto di fegato. Finora si contano non più di 150 trapianti di epatociti in pazienti in lista di trapianto d'organo e/o affetti da malattie metaboliche. Uno dei vantaggi del trapianto di epatociti è stato permettere a persone in lista d'attesa di guadagnare tempo, accompagnandoli con maggiori probabilità di compatibilità e sopravvivenza al trapianto di fegato.

Una volta trapiantati, gli epatociti sono in grado di compiere tutte le funzioni epatiche, arrestando o addirittura invertendo il processo che causa la malattia, facilitando il naturale processo di rigenerazione del fegato. Questa rigenerazione avviene anche mediante le cellule del paziente sopravvissute al danno e sbloccate dai freni che impedivano loro di riparare l'organo colpito. L'innata capacità rigenerante è una proprietà ben nota (si stima che il nostro fegato si rigeneri completamente ogni anno). Grazie all'infusione di epatociti funzionanti, ora possiamo fornire al fegato il tempo e la capacità funzionale necessari a superare il danno letale.

Il trapianto di cellule si è dimostrato utile a correggere sintomi anche gravi di malattie del metabolismo, come per esempio la sindrome di Crigler-Najjar, collegata al metabolismo della molecola chiamata bilirubina, o a ostacolare l'accumulo di urea nei tessuti, che con i suoi effetti tossici e degenerativi conduce spesso a stati comatosi irreparabili. Abbiamo anche trattato deterioramenti cognitivi o ritardi nello sviluppo generati dal mancato metabolismo di amminoacidi come nella più diffusa fenilchetonuria.

Nonostante il suo quarto di secolo di attività, ancora oggi il trapianto di epatociti è una terapia cellulare limitata a poche realtà. Negli ultimi anni solo cinque istituti europei hanno seguito questo approccio clinico: il King's College Hospital di Londra, l'Università Cattolica di Lovanio a Bruxelles, la Medizinische Hochschule di Hannover, l'Hospital Universitario y Politécnico de La Fe di Valencia e il Karolinska Institutet di Stoccolma. Oltreoceano questa terapia è stata applicata al Children's Hospital di Pittsburgh, negli Stati Uniti. L'offerta limitata è dovuta alla complessa e deli-

cata procedura di isolamento degli epatociti e a problemi che riguardano la sopravvivenza a lungo termine di queste cellule. Le iniezioni di epatociti sono ottenute tramite procedure accurate di prelievo, manipolazione, identificazione e, quando possibile, conservazione delle cellule prima dell'infusione al paziente. Le cellule che usiamo nei nostri trapianti devono rispondere rigorosamente a due richieste: devono essere vive, ovvero essere forti abbastanza da sopravvivere al complesso procedimento di isolamento dal fegato del donatore; e devono essere cellule mature, in grado cioè di svolgere le molteplici, peculiari funzioni del fegato, incluse quelle necessarie al paziente.

Anche se possono sembrare banali, queste caratteristiche hanno richiesto anni di studio per arrivare a preparare epatociti idonei al trapianto. Il primo importante ostacolo ha riguardato la messa a punto di una tecnica efficiente e l'identificazione di reagenti idonei a isolare epatociti umani per l'uso clinico (*si veda il box a p. 63*). Le cellule che usiamo nei trapianti devono essere isolate dal tessuto in condizioni di sterilità per garantire il minimo rischio al ricevente. In seguito gli epatociti sono sottoposti a rigorosi test funzionali sviluppati grazie alla nostra decennale esperienza. Negli ospedali in cui ho effettuato il trapianto di epatociti (prima il Children's Hospital a Pittsburgh, negli Stati Uniti, e ora il Karolinska University Hospital a Stoccolma), ho usato queste analisi per abbinare il ricevente alle cellule del donatore, allo scopo di garantire la più efficiente e rapida correzione della patologia.

Un altro ostacolo importante al trapianto è la conservazione degli epatociti da subito dopo il prelievo fino al trapianto nel paziente ricevente. In genere in altri trapianti cellulari (per esempio di midollo osseo o di sangue cordonale) le cellule sono congelate e conservate anche per anni in attesa di un ricevente. Purtroppo con le cellule del fegato questa strategia non funziona. Gli epatociti umani mal tollerano i protocolli attuali di congelamento. Anni di esperimenti e test di funzionalità hanno reso possibile la conservazione di epatociti umani a basse temperature (ma non sotto lo zero), e per non più di 2-4 giorni. Aggiriamo il problema intervenendo tempestivamente: quando è disponibile un fegato da cui isolare epatociti, il gruppo deputato alla preparazione delle cellule e i chirurghi che preparano il paziente a ricevere l'infusione sono mobilitati in contemporanea, lavorando a stretto contatto e in sinergia.

Infine gli epatociti sono inseriti nel tessuto del fegato del paziente. Queste cellule vengono iniettate nel sistema circolatorio che porta direttamente al fegato mediante l'infusione di una soluzione liquida in cui sono immerse. Una volta entrati in questo organo, gli epatociti riescono a integrarsi nel tessuto e a funzionare in brevissimo tempo, svolgendo tutte le mansioni che li caratterizzano, in particolare quelle che nel paziente non sono attive, portando a un rapido miglioramento delle condizioni cliniche. Le cellule che non riescono a integrarsi nel tessuto entro le prime 24 ore sono rimosse dagli «spazzini» del sistema immunitario, senza alcun rischio per il paziente.

Questa descrizione sottolinea come, al contrario del trapianto d'organo, l'infusione di epatociti umani sia una procedura chirurgica tutt'altro che invasiva. In tutte le infusioni che abbiamo effettuato a Pittsburgh, prima di importare questa tecnica in Europa, i chirurghi sono arrivati alla vena porta, un tronco venoso che conduce al fegato, passando attraverso l'ombelico, incannulando la vena ombelicale ormai atrofizzata. Questa procedura permette un'infusione rapida e indolore di cellule in pazienti pediatrici e in pazienti adulti, senza richiedere alcuna incisione e senza lasciare cicatrici vistose.

Tante cellule per un paziente

Un'altra domanda interessante a cui abbiamo dovuto rispondere riguardava il numero di epatociti da infondere per garantire con un certo grado di sicurezza la correzione della malattia. La quantità di cellule che è possibile trapiantare può variare, e di molto, in base alla patologia da correggere, nonché all'età e alle dimensioni del paziente.

Nel caso di epatiti fulminanti, dovute a overdose farmacologiche o avvelenamento (da funghi, per esempio), pochi milioni di epatociti infusi nel paziente hanno fatto la differenza tra la vita e la morte. Le cellule infuse hanno permesso al paziente in fin di vita di superare il danno e guadagnare il tempo necessario affinché si verificasse la rigenerazione spontanea del proprio fegato, traghettandolo verso una risoluzione completa e duratura.

In pazienti affetti da malattie del metabolismo abbiamo dovuto infondere una quantità maggiore di epatociti, pari al 5-10 per cento della massa del fegato (ovvero qualche miliardo di cellule). Una volta impiantatosi nel fegato, le cellule devono svolgere la funzione mancante, e lo devono fare per il resto della vita del paziente. Se le cellule trapiantate non sopravvivono, la patologia si manifesterà nuovamente.

Nel caso di epatiti fulminanti, pochi milioni di epatociti infusi hanno fatto la differenza tra la vita e la morte

Il trapianto di un gran numero di epatociti ha richiesto necessariamente procedure multiple. Iniezioni molteplici di epatociti (diluite nell'arco di giorni) spesso prelevati da donatori diversi ci hanno permesso di infondere i 5-15 miliardi di cellule capaci di svolgere la funzione essenziale ma assente e di garantire la correzione della malattia. Per esempio, nell'ultimo trapianto che abbiamo effettuato al Karolinska sono state necessarie ben sei infusioni, a distanza di mesi, di cellule prelevate da due donatori per infondere i sei miliardi di cellule necessarie a trattare un paziente adolescente.

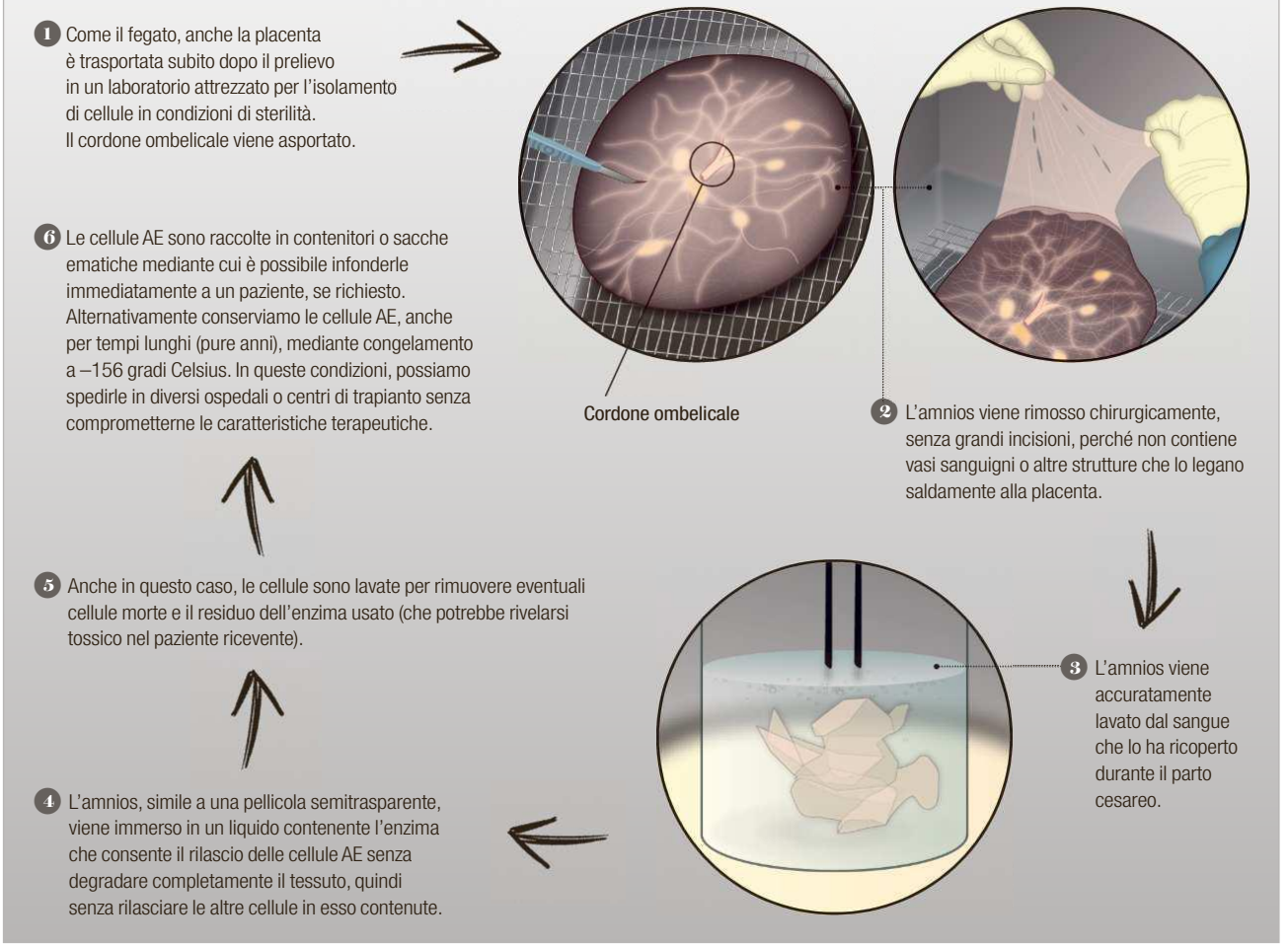
Un paziente per tante cellule

Il vero grande ostacolo è da sempre la disponibilità di fegati da cui isolare epatociti. In questi vent'anni sono stati usati esclusivamente organi scartati dalle procedure di trapianto. Il rifiuto di trapiantare un organo ha spesso ragioni che ben riflettono la qualità delle cellule stesse. La limitazione è stata parzialmente risolta mediante l'uso di fegati espiantati, cioè rimossi durante un trapianto. Questi fegati hanno un difetto a carico di un singolo enzima, ma sono normali per quel che riguarda tutte le altre attività. Dunque ci è sembrato utile isolare gli epatociti da questi fegati, consapevoli del difetto che queste cellule portano nel loro DNA, ma anche delle loro altre innumerevoli capacità. Un'idea che si è rivelata vincente.

Nel 2012 il nostro gruppo ha effettuato un trapianto di epatociti isolati da un donatore con un difetto enzimatico, iniettandoli in un paziente con un difetto differente, riuscendo così a correggere la malattia. Questa strategia terapeutica è sicura, perché il trapianto di pochi miliardi di cellule, pur difettose in un enzima, non è sufficiente a generare nei riceventi la malattia dei donatori. Al

L'isolamento delle cellule AE della placenta

Le prime procedure documentate sull'isolamento delle cellule AE sono state effettuate poco più di dieci anni fa dal nostro gruppo di ricerca. Per questioni di sterilità, usiamo solo placente umane dopo parti cesarei a termine senza complicanze. Il rilascio di queste cellule è ottenuto mediante una procedura che ricorda quella delle cellule del fegato, poiché si usa un enzima specifico che però non è messo in circolo attraverso i vasi sanguigni (come invece avviene nella procedura dell'isolamento di epatociti).



contrario la capacità metabolica delle cellule donatrici è sufficiente a correggere i sintomi della patologia per cui è stato necessario il trapianto. Abbiamo iniettato cellule funzionanti a colmare la lacuna del paziente e abbiamo lasciato che l'enzima di cui le cellule donatrici erano sprovviste venisse fornito dalle cellule circostanti, quelle del fegato del ricevente: una compensazione «a mosaico» che evita di dover sostituire tutto l'organo. Proprio grazie a questo approccio abbiamo corretto con successo la fenilchetonuria, il difetto epatico della paziente che ha pronunciato le parole all'inizio di questo articolo.

Finora sono due i pazienti affetti da fenilchetonuria che hanno ricevuto il trapianto di epatociti. Il nostro gruppo e quello di Bruxelles sono stati i primi a tradurre in realtà clinica l'idea del trapianto «a mosaico», che avevamo dimostrato pochi mesi prima. Un approccio di cui può beneficiare non solo la fenilchetonuria. E in ogni caso il nostro lavoro non finisce qui, visto che negli anni passati abbiamo vagliato anche l'uso di cellule staminali.

Una sorgente inaspettata

Le staminali sono cellule dell'organismo non ancora differenziate e con una spiccata attitudine a moltiplicarsi. Inoltre le cellule staminali sono note per la loro importante capacità di maturare nei diversi tipi di cellule adulte che compongono organi e tessuti del corpo. Il differenziamento tuttavia è spesso incompleto, ed è accompagnato da diversi, a volte insufficienti gradi di funzionalità. Per correggere malattie del metabolismo è necessario identificare cellule che non solo abbiano caratteristiche di staminalità, ma soprattutto siano in grado di maturare fino a diventare cellule epatiche adulte e funzionanti. Ma dallo loro scoperta negli anni sessanta, nessuna delle staminali identificate fino a oggi aveva superato i rigorosi test di funzionalità epatica.

Così, la nostra esperienza leader nell'isolamento e nella preparazione di epatociti idonei al trapianto ha portato il nostro gruppo a identificare nelle cellule epiteliali dell'amnios della placenta una sorgente di staminali dalle fortissime potenzialità per la cura

Illustrazione di Marco Marzola

di malattie epatiche. L'amnios è una membrana a forma di sacco che avvolge il feto, mantenendolo immerso e protetto nel liquido amniotico durante i nove mesi di gravidanza.

In particolare, l'amnios è un tessuto privo di vasi sanguigni e molto semplice nella struttura, formato da proteine che conferiscono resistenza ed elasticità. Sulla superficie più interna, esposte al contatto e agli urti del feto, ci sono le cellule epiteliali dell'amnios, abbreviate in cellule AE. Queste cellule si originano nei primissimi giorni di gravidanza, quando il nascituro non è che un piccolo embrione, un agglomerato di cellule non ancora divise nei diversi tessuti. In quei primissimi giorni di vita, alcune cellule si staccano dall'embrione e generano l'amnios, componente essenziale affinché la gravidanza prosegua con successo. Organizzate e compatte, le cellule AE svolgono svariate funzioni, incluse la produzione del liquido amniotico e la «rottura delle acque» al termine dei nove mesi. Ancora più importante è la loro funzione protettrice nei confronti del sistema immunitario materno. Senza l'intermediazione della placenta, in particolare delle cellule dell'amnios, il feto sarebbe riconosciuto come «organismo estraneo» dal sistema immunitario della madre, poiché costituito al 50 per cento dal patrimonio genetico paterno (l'altra metà ovviamente proviene dalla madre), rifiutato ed espulso in modo veloce, come purtroppo spesso avviene in aborti spontanei prematuri.

Il fatto che le cellule AE abbiano un'origine così prematura, per poi durare fino alla fine della gestazione, le rende particolari e preziose. Queste cellule, proprio perché si sono originate nei primissimi giorni di gravidanza da cellule che daranno forma al feto e a tutte le tipologie cellulari di un adulto, sembrano mantenere la «memoria», la potenzialità di differenziarsi in cellule diverse. Per questo, tanti gruppi di ricercatori e di clinici hanno guardato con crescente interesse a questo tessuto, caratterizzato da una disponibilità senza fine.

Per avere un'idea, nel 2017 si stima siano venuti alla luce poco più di 460.000 bambini in Italia. La placenta, espulsa dopo il bambino durante il parto, normalmente è gettata come tessuto di scarto. L'uso di tessuti come la placenta, così come è stato per anni con il cordone ombelicale, non solleva questioni di natura etica o religiosa, al contrario dei dibattiti sollevati dall'uso di staminali ottenute da embrioni.

Risultati incoraggianti

Da una decina di anni ormai il nostro gruppo di ricerca ha dimostrato le potenzialità terapeutiche delle cellule AE prelevate da placente umane; si tratta di uno studio iniziato negli Stati Uniti, ma che ora siamo fieri di avere importato in Europa per poterlo offrire a centri e ospedali da questa parte dell'Oceano Atlantico. Nel corso degli ultimi dieci anni abbiamo capito come isolare le cellule AE e le abbiamo usate in studi pre-clinici per valutarne sicurezza ed efficacia nel trattamento di malattie epatiche.

Grazie a scrupolosi controlli e alla messa a punto di nuovi reagenti, nel 2015 abbiamo pubblicato su «Current Protocols in Stem Cell Biology» una tecnica sicura e accurata per isolare cellule epiteliali dell'amnios da usare in clinica (*si veda il box a p. 65*). L'infusione di queste cellule ricalca fedelmente il trapianto di epatociti, e il microambiente incontrato dalle cellule AE una volta iniettate nel fegato sembra sufficiente a innescarne il differenziamento e a farle diventare cellule epatiche con caratteristiche di maturità e funzionalità ben superiori alle attese più rosee. Finora le cellule AE sono le sole staminali ad avere fornito i risultati più esaurienti e completi per un potenziale impiego terapeutico nella cura delle diverse malattie epatiche.

Incoraggiati dalla totale assenza di rischi ed effetti collaterali (come la formazione di nuovi tessuti patogeni o tumorali), abbiamo trapiantato cellule AE umane in modelli animali di malattie epatiche. L'uso di modelli animali, per quanto triste, è di importanza imprescindibile per valutare efficacia e sicurezza di una nuova terapia prima del suo uso nella pratica clinica. Abbiamo quindi impiegato animali da laboratorio (nel minor numero possibile) per testare l'efficacia delle cellule AE nella correzione delle diverse malattie del fegato. Forti dell'esperienza con cellule epatiche mature umane e del loro ruolo nei trapianti clinici, abbiamo progettato protocolli per valutare l'effetto terapeutico delle cellule AE nelle malattie del fegato, le stesse che in precedenza avevamo corretto con il trapianto di epatociti.

I nostri risultati confermano che l'uso di queste staminali può essere di grande aiuto nelle malattie del fegato. Le cellule AE possono offrire un supporto temporaneo e un aiuto per sbloccare i fenomeni naturali di rigenerazione necessari per curare un'epatopatia fulminante. Ma non solo. Ovviamente abbiamo investigato la possibilità di offrire una nuova cura anche a malattie del metabolismo mediante l'uso delle cellule AE. La MSUD (o malattia delle urine a sciroppo d'acero) e la già citata e ben più diffusa fenilchetonuria sono state le prime malattie a confermarci soddisfacenti livelli di correzione della patologia. Al momento sono al vaglio molte altre malattie genetiche, anche quelle definite «orfane», ovvero prive di terapie, almeno per ora.

Con il trapianto di cellule AE possiamo offrire opportunità terapeutiche per malattie finora ritenute incurabili

La medicina ha imparato a identificare molte malattie del metabolismo fin dai primi giorni di vita grazie allo screening neonatale, affinché le si possa trattare e garantire la sopravvivenza al paziente. E la prima malattia per cui si è ritenuto necessario effettuare un'identificazione puntuale e precoce è appunto la fenilchetonuria: una tra le patologie più comuni del metabolismo, con un'incidenza tra le più elevate (negli Stati Uniti, e ancora di più in Italia). Ecco perché i nostri studi sono da sempre sostenuti (economicamente ma non solo) dall'American National PKU Alliance, un'associazione di pazienti e famiglie che vede nelle terapie cellulari un sostegno o addirittura una speranza di cura per questa patologia. Si stima che in Italia un bimbo su 10.000 nasca con questo difetto enzimatico, quindi quasi ogni settimana nasce un bambino che speriamo presto possa trarre beneficio dal trapianto di cellule AE. La fenilchetonuria, inoltre, nonostante l'incidenza e la gravità nelle varie fasi dello sviluppo, normalmente non è candidata al trapianto di fegato. Questa preclusione, che oltre i bambini riguarda anche i giovani adulti, nasce dal timore degli effetti collaterali generati dalla terapia immunosoppressiva, un passaggio ineludibile, necessario per mantenere i tessuti e le cellule donatrici in vita. Ma l'immunosoppressione è obbligatoria anche con i trapianti di cellule AE?

Trapianti senza soppressione

Come nel trapianto d'organo, anche le cellule infuse sono prelevate da donatori caratterizzati da un certo grado di compatibilità con i riceventi. Dunque anche nei trapianti di cellule (staminali o epatociti che siano) da sempre è stato necessario ricorrere a tera-

Via di corsa. Una delle difficoltà del trapianto d'organo e di cellule può riguardare il trasferimento a basse temperature e con un trasporto di emergenza.

Custom Medical Stock Photo/Science Photo Library/AGF

pie immunosoppressive per evitare il rigetto delle cellule trapiantate. Forse la più innovativa e stupefacente caratteristica delle cellule AE è la possibilità di usarle senza essere vincolati a stringenti criteri di compatibilità, ovvero senza l'imprescindibile necessità di dover ricorrere a «fastidiosi» protocolli di immunosoppressione. In tutti gli animali che abbiamo trattato finora con cellule umane AE non abbiamo mai applicato protocolli di immunosoppressione, né abbiamo mai registrato fenomeni di rigetto. Ed è un dato impressionante, considerando che tra essere umani e topi non vi è alcun grado di compatibilità!

Al Karolinska, in collaborazione con alcuni gruppi italiani, abbiamo in corso ulteriori studi: c'è ancora molto da capire riguardo a questa caratteristica innovativa delle cellule AE. Una caratteristica che è alla base delle relazioni tra il sistema immunitario materno e quello del feto. Negli ultimi mesi abbiamo condiviso con la comunità scientifica nuove e affascinanti strategie molecolari delle cellule AE. E finora il nostro gruppo è riuscito a identificare e illustrare quattro nuove strategie del genere mai osservate prima in nessuna altra cellula. Sono meccanismi che potrebbero anche aiutarci nella lotta al cancro, che tuttavia al momento contiamo di sfruttare proprio nelle terapie di medicina rigenerativa, applicata al fegato ma anche a molti altri organi del corpo umano.

Non solo fegato

Negli ultimi anni, un crescente numero di gruppi di ricerca si è interessato alle notevoli possibilità offerte dalle cellule AE. Ma ancora di più sono le speranze e le necessità in gioco. La disponibilità di una terapia sostitutiva o complementare al trapianto d'organo è una delle priorità della medicina rigenerativa.

La collaborazione che si crea tra gruppi di eccellenza è un potente motore che può portare a nuove terapie. Ed è appunto grazie alle collaborazioni tra il nostro gruppo e giovani eccellenze italiane (penso a Fabio Marongiu, dell'Università di Cagliari, o a Fabio Morandi, dell' IRCCS Istituto «Giannina Gaslini» di Genova) che abbiamo ottenuto risultati di primaria importanza. Ma non solo. Lavori congiunti con l'Università di Bari e l'Università di Torino, o con l'Istituto di ricerche farmacologiche «Mario Negri» di Bergamo, ci permettono di spostare l'asticella dei successi sempre più in alto e, forse, in un prossimo futuro ci permetteranno di importare queste terapie anche in Italia.

Poiché i nostri risultati preclinici si sono rivelati un successo ben oltre le aspettative, siamo stati incoraggiati a iniziare quanto prima i trapianti clinici al Karolinska: stimiamo di poter trattare i primi pazienti già nella seconda metà del 2018. Siamo pronti per produrre cellule AE a scopi clinici. Siamo in attesa delle ultime autorizzazioni per creare la prima banca di cellule AE. Sarà una banca sul modello di quelle create per il sangue del cordone ombelicale o il midollo osseo, a cui si affiancherebbe per fornire terapie cellulari aggiuntive e complementari. Infatti, un'altra importante caratteristica delle cellule AE è la loro resistenza ai protocolli di congelamento e scongelamento. Un vantaggio che ci permette di avere queste cellule sempre pronte, disponibili su richiesta e in grado di essere spedite a centri di trapianto in qualsiasi parte del globo.

Probabilmente le prime malattie che usufruiranno di questo approccio terapeutico saranno quelle orfane. Ma potranno trarne vantaggio anche tutte le altre malattie del metabolismo che siano già state trattate con successo con il trapianto di epatociti.

Forti dell'esperienza con cellule epatiche mature e del loro ruolo nei trapianti clinici, confidiamo di poter ampliare la gamma di malattie che possiamo trattare, nel più breve tempo possibile. Con il trapianto di cellule, epatociti o cellule AE della placenta, abbiamo la capacità di influire su rigenerazione e riparazione, e possiamo offrire nuove opportunità per la correzione di malattie epatiche ritenute finora incurabili. Ma non solo. Malattie polmonari, renali e neuronali sono le ultime in ordine di tempo che potrebbero beneficiare dalle AE. Al Monash Health di Melbourne hanno iniziato trattamenti clinici basati sui nostri protocolli, e credo sia lecito supporre che molti altri seguiranno. Malati di ogni età possono guardare con rinnovata speranza alle opportunità terapeutiche offerte dalle terapie cellulari. Inoltre, importanti, recenti risultati ci portano a ipotizzare di poter usare queste cellule per la cura di forme tumorali. Ma questo è un discorso più ampio, e siamo ancora nella fase di sperimentazione preclinica. Sperimentazione che col supporto e collaborazione di tutti speriamo di rendere concreta e accessibile a tutti nel corso di pochi anni. ■

PER APPROFONDIRE

Clinical Hepatocyte Transplantation: Practical Limits and Possible Solutions. Gramignoli R., Vosough M., Kannisto K., Srinivasan R.C. e Strom S.C., in «European Surgical Research», Vol. 54, nn. 3-4, pp. 162-177, gennaio 2015.

Therapeutic Use of Human Amnion-Derived Products: Cell-Based Therapy for Liver Disease. Gramignoli R., in «Current Pathobiology Reports», Vol. 4, pp. 157-167, luglio 2016.

Isolation of Human Amnion Epithelial Cells According to Current Good Manufacturing Procedures. Gramignoli R., Srinivasan R.C., Kannisto K., Strom S.C., in «Current Protocol for Stem Cell Biology»,Vol. 37, pp.1E.10.1-1E.10.13, marzo 2016.

Human Amnion Epithelial Cells Expressing *HLA-G* as a Novel Cell-Based Treatment for Liver Disease. Strom S.C. e Gramignoli R., in «Human Immunology», Vol. 77, pp. 734-739, settembre 2016.

Illustrazione di Amy Martin

Un'occhiata all'interno

Le tecniche di imaging cerebrale potrebbero trovare le cure migliori per la depressione e le dipendenze, e potrebbero addirittura rimodellare l'istruzione

di John Gabrieli

John Gabrieli dirige l'Athinoula A. Martinos Imaging Center presso il McGovern Institute for Brain Research del Massachusetts Institute of Technology. È anche titolare della cattedra Grover Hermann presso la Harvard-MIT Division of Health Sciences and Technology.

Ogni giorno, persone che soffrono di disturbi di salute mentale ricevono prescrizioni di terapie mediche che non le aiuteranno. Trovare cure che funzionino per questi pazienti comporta un difficile processo per tentativi ed errori. Ogni terapia fallita rischia di lasciare il paziente nello sconforto e nel dubbio che niente sarà in grado di aiutarlo.

Il caso della depressione illustra perfettamente che cosa può andare storto. Secondo gran parte delle stime, da metà a due terzi dei pazienti con una diagnosi di depressione non migliorano con nessuna cura. I protocolli di ricerca sulla depressione consistono in studi clinici che, tipicamente, valutano l'efficacia generale di un farmaco o di una terapia comportamentale in base alla media dei benefici per un paziente ma non tengono conto dell'ampio ventaglio di risultati sui singoli pazienti: da una guarigione completa a nessun miglioramento. La valutazione delle terapie farmacologiche della depressione più lunga e con un numero maggiore di soggetti è di uno studio dei National Institutes of Health chiamato STAR*D e condotto su migliaia di pazienti di diverse strutture sanitarie, che illustra quanto può accadere. All'inizio ogni partecipante ha ricevuto un certo farmaco; circa un terzo dei volontari è migliorato significativamente. Solo un quarto circa di quelli che non avevano risposto al primo farmaco ha tratto benefici dal secondo. Dopo una terza e poi una quarta prescrizione di farmaci sempre diversi, il 70 per cento dei pazienti ha reagito positivamente. La maggior parte di loro, tuttavia, ha dovuto provare una o più terapie prima di trovare un farmaco che funzionava nel suo caso.

Il fallimento di una cura non prolunga solo la sofferenza, scoraggia i pazienti a cercare aiuto. I partecipanti allo studio STAR*D sapevano che nella fase successiva avrebbero potuto accedere ad altre terapie; nonostante questo, molti si sono ritirati. Un numero sostanziale di pazienti ha abbandonato lo studio dopo il fallimento della prima cura farmacologica, circa il 30 per cento dopo la seconda terapia e circa il 42 per cento dopo la terza. Per inciso, la cura comportamentale della depressione mediante un certo tipo di psicoterapia, nota come terapia cognitivo-comportamentale (o CBT, dalle iniziali inglesi), ha giovato molto a circa la metà dei pazienti.

La spiegazione delle difficoltà incontrate dagli psichiatri è legata alle imprecisioni e agli imperativi economici dello sviluppo dei farmaci. Due persone a cui è stato diagnosticato lo stesso disturbo mentale possono rispondere alla stessa terapia farmacologica in modi completamente diversi, a causa dell'attuale incapacità di valutare chi reagirà a quale cura. Le case farmaceutiche, tuttavia, in genere puntano a servire il mercato più ampio possibile invece di cucire le cure su misura di piccoli gruppi di pazienti con una determinata forma di depressione o di un altro disturbo psichiatrico. I produttori dei farmaci sono anche privi degli strumenti necessari per mettere in atto un approccio più preciso. Le tecniche diagnostiche per prevedere se una persona trarrà beneficio da una certa terapia non fanno parte della normale attività medica.

Negli ultimi anni varie tecniche di imaging cerebrale, combinate con algoritmi sofisticati che analizzano l'attività neurale, hanno iniziato a rivelare differenze tra i cervelli degli individui che consentono di prevedere se un dato farmaco o una certa psicoterapia sono in grado di far uscire un paziente dalla depressione o di mitigare gravi forme di sociofobia. Le prime versioni di queste tecniche diagnostiche si sono dimostrate promettenti anche per determinare le probabilità di ricaduta di un alcolista e hanno addirittura iniziato a consentire di identificare se uno studente, durante il suo percorso scolastico, si troverà in difficoltà nelle materie letterarie o in matematica.

Le scansioni cerebrali per costruire cure su misura incarnano una nuova forma di medicina personalizzata: si tratta di un approccio fondato su terapie costruite *ad hoc*, sulla base della genetica individuale. Non c'è dubbio che i geni possono predisporre una persona alle malattie mentali. Per ciascuno di noi, tuttavia, esiste soltanto una debole relazione tra un dato gene e i comuni disturbi psichiatrici; anche l'esperienza ha un ruolo fondamentale nel determinare quali geni si attivano nel cervello. Per quanto le tecniche di imaging abbiano molti limiti, approssimano ciò che sta accadendo in quel momento nel cervello combinando geni ed esperienza. Sono attualmente in grado di prevedere le prospet-

IN BREVE

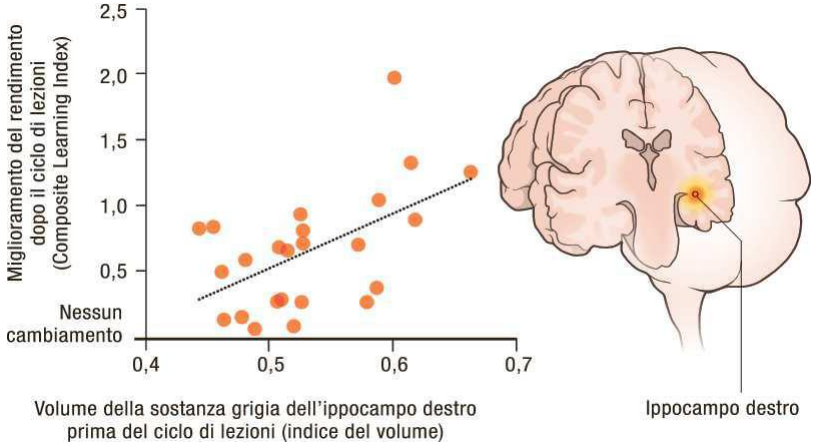
Le cure efficaci per le malattie mentali scarseggiano. I farmaci e le psicoterapie disponibili oggi tendono ad aiutare alcuni pazienti, ma non altri. Gli operatori sanitari hanno bisogno di sviluppare modi migliori per adattare le cure ai singoli pazienti.

La possibilità di prevedere con una scansione cerebrale chi trarrà giovamento da una cura sembra incoraggiante. Un giorno le differenze nell'attività neurale potrebbero dire ai clinici quale cura per la depressione sarà più efficace per un individuo o quale ex alcolista avrà una ricaduta.

Tecniche diagnostiche analoghe potrebbero aiutare educatori e studenti. Un tipo di risonanza magnetica, per esempio, ha già previsto meglio delle prove standard quali bambini dislessici avrebbero migliorato le capacità di lettura.

Maggiori probabilità di successo

In un mondo ideale, gli insegnanti sanno quali studenti reagiranno meglio a quale programma scolastico. I ricercatori della Stanford University hanno cercato di capire se le scansioni cerebrali possono aiutare a realizzare questo sogno. Hanno preso 24 bambini di terza elementare e li hanno messi in una macchina per la risonanza magnetica prima di sottoporli a un ciclo di lezioni private di matematica di otto settimane. I bambini le cui scansioni mostravano nell'ippocampo destro un maggior volume di tessuto (sostanza grigia) hanno avuto, dopo la fine del ciclo, un rendimento migliore di quelli che avevano un volume di tessuto inferiore; l'ippocampo destro è una regione del cervello che ha un ruolo critico nella formazione di nuovi ricordi.



tive di una cura con precisione migliore rispetto alla sola genetica. Man mano che si raffinano sempre più, tuttavia, un giorno la combinazione di misure compiute sui geni e sul cervello potrebbe offrirci previsioni ancora più accurate.

Funzionerà?

Uno studio condotto dal mio gruppo al Massachusetts Institute of Technology mostra le prospettive delle previsioni del funzionamento di una cura. Abbiamo studiato la risposta alla terapia cognitivo-comportamentale di pazienti con sociofobia. La fobia sociale, caratterizzata da un'intensa paura di interagire con gli altri, è ancora uno dei disturbi psichiatrici più comuni negli Stati Uniti. In forma grave, spesso è così disabilitante da impedire a chi ne è affetto di avere un lavoro. Nel nostro studio, tutti i pazienti sono stati sottoposti a psicoterapia comportamentale. Volevamo scoprire se le misure cerebrali fatte *prima* della terapia erano in grado di prevedere chi ne avrebbe giovato in modo sostanziale.

I pazienti guardavano volti con espressioni emotive neutre o negative (rabbia) mentre ne registravamo le reazioni con la risonanza magnetica funzionale (fMRI), una tecnica di imaging che misura i cambiamenti nel flusso sanguigno. Abbiamo anche posto una serie di domande, con l'intento di quantificare la gravità dei disturbi d'ansia. I pazienti che, davanti ai volti arrabbiati, rispondevano più intensamente nella parte posteriore del cervello, che elabora i volti e altri oggetti nel nostro campo visivo, avevano maggior probabilità di ottenere buoni risultati con la terapia. Le previsioni su chi sarebbe migliorato con la CBT sono state tre volte più precise rispetto ai risultati ottenuti da una valutazione della gravità del disturbo effettuata con un questionario.

Per valutare l'efficacia della psicoterapia abbiamo usato anche un altro approccio, che combinava due tecniche. Una, la risonanza magnetica con tensore di diffusione, valuta come le connessioni stabilite dai fasci di fibre nervose (la materia o sostanza bianca) consentono alle diverse aree del cervello di comunicare fra loro. La sostanza bianca consiste in fasci di lunghe propaggini dei neuroni, gli assoni, rivestiti da un materiale grasso e biancastro chiamato mielina.

La seconda tecnica misura quali connessioni cerebrali si collegano fra loro quando una persona è sdraiata nella macchina per la risonanza magnetica. Con questi dati i ricercatori hanno messo insieme una mappa dei network cerebrali; grazie a essa hanno creato uno strumento diagnostico, un biomarcatore, che ha migliorato di cinque volte la previsione di quali pazienti avrebbero tratto giovamento dalla psicoterapia. Altri studi hanno confermato che una strategia simile sembra efficace nel determinare la risposta alla CBT dei pazienti con depressione.

La previsione della risposta a un farmaco per un disturbo psichiatrico può combinare le tecniche di imaging con test psicologici più convenzionali. Andrea N. Glodstein-Piekarski, della Stanford University, e colleghi hanno esaminato le reazioni ai farmaci antidepressivi. Hanno intervistato i pazienti sugli stress subiti nelle prime fasi di vita e hanno poi usato la fMRI per valutare l'attività dell'amigdala, una struttura cerebrale che elabora le emozioni. Nella macchina per la risonanza, i pazienti dovevano guardare una serie di volti allegri. Una combinazione delle informazioni sugli stress subiti nell'infanzia e le reazioni della sua amigdala ai volti indicava se i farmaci antidepressivi avrebbero fatto bene a quell'individuo. Gli studi di Siegle e Goldstein-Pierkarski non confrontavano la psicoterapia con i farmaci, ma Helen Mayberg, della Emory University, ha mostrato che l'imaging cerebrale può anche rivelare se per una persona depressa è più efficace un aiuto psicoterapeutico o farmacologico.

Prevedere le ricadute

Le cure per l'alcolismo, la tossicodipendenza, il fumo e l'obesità condividono l'obiettivo di ridurre o azzerare l'uso di droghe, tabacco o cibo. Anche qui le tecniche di imaging possono avere un ruolo nel prevedere chi ricadrà nella trappola della dipendenza. Metà dei pazienti curati per l'abuso di alcool torna a bere entro un anno dalla fine della terapia, e gli stimolanti come la cocaina hanno tassi di ricaduta simili.

Ci sono poche prove scientifiche che aiutino a determinare la durata di programmi come il classico ricovero di 28 giorni in un centro di disintossicazione. Le ricerche devono ancora dimostrare se una terapia più breve o più lunga potrebbero essere più efficaci. Idealmente, gli studi potrebbero verificare se un dato paziente avrà una ricaduta dopo sei mesi o un anno, e questo permetterebbe di far durare i programmi secondo i bisogni di ciascuno.

Gli studi di imaging che fanno previsioni sui risultati nel caso dell'obesità o di dipendenze da alcool o droghe non sono comu-

Illustrazione di Falconieri Visuals (*cervello*). Grafico di Jen Christiansen. Fonte: SUPEKAR K., e altri, *Neural Predictors of Individual Differences in Response to Math Tutoring in Primary-Grade School Children*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences USA», vol. 111, n. 20, 14 maggio 2013.

ni come quelli che studiano i casi di depressione. Un certo numero di essi suggerisce però che le misure cerebrali potrebbero prevedere chi riuscirà ad astenersi dopo la fine della cura. Uno studio dell'Università della California a San Diego ha scoperto che una risonanza magnetica al cervello alla fine di una cura per l'abuso di metanfetamine prevedeva quali pazienti sarebbero andati incontro a ricadute nei successivi 12 mesi.

In uno studio dell'Università dell'Alabama con imaging MRI per la prevenzione dell'obesità i ricercatori hanno scoperto che in un gruppo di 25 persone obese e sovrappeso che guardavano immagini di pietanze molto caloriche prima di iniziare una dieta di 12 settimane si attivavano le aree del sistema della ricompensa che fanno prestare attenzione al cibo (il nucleo accumbens, la corteccia cingolata anteriore e l'insula). Una maggiore attivazione di queste aree era predittiva di chi avrebbe fatto più fatica a perdere peso una volta finito il programma: nove mesi dopo, i partecipanti con un'alta attivazione dell'insula e delle altre aree del sistema della ricompensa facevano più fatica a continuare a seguire la dieta.

L'imaging cerebrale può addirittura aiutare a formulare i messaggi per incoraggiare i pazienti ad adottare comportamenti salutari. Emily Falk, dell'Università della California a Los Angeles, ha condotto uno studio in cui ha chiesto ai partecipanti di imparare il modo corretto di usare le protezioni solari. I ricercatori hanno usato l'fMRI per registrare le reazioni dei partecipanti mentre guardavano diapositive che prescrivevano le misure preventive. In un secondo momento i partecipanti descrivevano il proprio atteggiamento nei confronti dell'uso delle protezioni solari.

Una settimana dopo, i membri del gruppo ricevettero messaggi e-mail in cui si chiedeva loro se avevano effettivamente applicato la lozione. Gli individui in cui l'attività di un'area del cervello che regola ciò in cui crediamo e il nostro senso del sé (la corteccia prefrontale mediale) era stata più alta durante la visione delle diapositive erano quelli che si erano protetti di più. Le scansioni offrivano una misura oggettiva dell'efficacia del programma, riuscendo ad andare oltre la singola valutazione soggettiva per valutare l'utilità delle informazioni sanitarie.

L'osservazione dell'attività cerebrale può anche aiutare a scoprire l'approccio migliore per dissuadere le persone dal continuare a fumare. Uno studio dell'Harvard Medical School su 21 donne pubblicato nel 2010 su «Biological Psychiatry» riferisce che una forte risposta a immagini collegate al fumo in due aree cerebrali (l'insula e la corteccia cingolata anteriore dorsale) era predittiva dell'incapacità di smettere.

Imparare meglio

Anche i sistemi educativi potrebbero beneficiare delle tecniche di imaging cerebrale, che consentirebbero di prevedere le difficoltà di apprendimento in lettura (dislessia) o in matematica (discalculia). I genitori e gli insegnanti fanno quel che possono, ma l'istruzione opera principalmente con il cosiddetto modello dell'attesa degli insuccessi. Gli insegnanti cercano di guidare un po' i ragazzi, finché questi non raggiungono un punto in cui si scoraggiano e il processo di apprendimento tende ad arenarsi.

Che cosa succederebbe se il sostegno didattico non si limitasse a reagire ai fallimenti ma riuscisse ad anticipare le situazioni in modo da adattare ai bisogni dei singoli studenti specifiche forme di insegnamento? Alcune recenti scoperte indicano che l'imaging cerebrale può aiutare a prevedere il futuro rendimento degli studenti. Nel prevedere i risultati che un ragazzo avrà a scuola, talvolta le misure cerebrali possono essere più efficaci degli indicatori convenzionali in ambito educativo e psicologico.

Tra i bambini dislessici c'è ampia variabilità individuale per quanto riguarda la capacità di compensare le difficoltà di lettura escogitando strategie che consentono di stare al passo con i compagni. Insieme a Fumiko Hoeft, oggi all'Università della California a San Francisco, ho misurato le reazioni cerebrali alla risonanza magnetica funzionale in ragazzi dislessici di circa 14 anni, già sottoposti a numerosi test psicologici, quando si trovavano di fronte a parole stampate su carta. Successivamente abbiamo esaminato di nuovo gli stessi ragazzi a 30 mesi di distanza, per vedere quanto fossero migliorati nella lettura. Circa metà dei soggetti leggeva decisamente meglio.

Nessun indicatore delle prove standardizzate sull'apprendimento è correlato a futuri progressi nella lettura, ma una combinazione delle scansioni cerebrali con le tecniche analitiche potrebbe consentire simili previsioni. Lo studio prevedeva un'analisi basata sulla classificazione dei pattern, un metodo che scava nei dati delle scansioni cerebrali con algoritmi di apprendimento automatico basati su *big data*; l'analisi è stata accurata al 90 per cento e oltre nell'indicare se la capacità di lettura di un ragazzo dislessico sarebbe migliorata oppure se avrebbe continuato ad avere difficoltà due anni dopo la registrazione delle immagini. Altri ricercatori hanno riferito che le risposte elettriche registrate sullo scalpo (i potenziali evocati) di bambini in età prescolare erano anch'esse predittive delle capacità di lettura. Sapere ciò che ci aspetta può permettere di intervenire prima che emergano problemi: una strategia che risparmia ai bambini il senso di fallimento generato dalle prime difficoltà.

Le misure cerebrali possono essere più efficaci degli indicatori convenzionali nel prevedere i risultati scolastici

Può trarne vantaggio anche l'insegnamento della matematica. Uno studio di Vinod Menon, della Stanford University, ha scoperto che l'anatomia cerebrale può far capire se uno studente di terza elementare aveva più possibilità di beneficiare da un programma di lezioni private di matematica che, come punto di partenza per risolvere i problemi in aritmetica, incoraggiava gli studenti a smettere di contare e passare al recupero dei fatti aritmetici (memorizzare che 2 + 3 = 5, per esempio). I test standardizzati sulle capacità matematiche o sul quoziente di intelligenza non erano in grado di prevedere quali studenti sarebbero stati aiutati dal programma, ma le misure cerebrali sì. In particolare, la dimensione dell'ippocampo destro (area legata alla memoria) era correlata ai progressi di un ragazzo.

Questi studi promettono di fondare un metodo di apprendimento personalizzato basato sulle neuroscienze. Se le ricerche riusciranno a identificare gli approcci didattici più efficaci per ciascuno studente, gli educatori potranno evitare i fallimenti che hanno luogo nell'infanzia o nell'adolescenza, quando le difficoltà di apprendimento diventano più ardue da correggere.

Alla ricerca di previsioni migliori

Se le misure cerebrali sono così promettenti per quanto riguarda la previsione delle risposte a una cura per disturbi mentali o agli interventi educativi, perché questi metodi non sono già in uso? Gli ostacoli da superare prima di poter entrare nelle scuole e ne-

gli ospedali sono parecchie. Per prima cosa, c'è bisogno che le previsioni abbiano maggior rigore statistico. Negli studi, finora, i modelli hanno collegato l'attività cerebrale a risultati già noti, per esempio il livello di miglioramento di un individuo dopo una certa terapia. In questo senso, sarebbe meglio chiamarle post-visioni anziché pre-visioni. I nuovi studi dovranno verificare se queste scoperte riescono a fare regolarmente previsioni accurate.

Perché la scienza delle previsioni possa progredire nell'ambito della salute mentale e dell'istruzione è necessario che la comunità dei ricercatori inizi a progettare studi che confrontano risultati di due gruppi indipendenti. Un modello matematico relativo a un gruppo può così essere validato dopo essere stato testato sull'altro.

Un approccio promettente, noto come *leave-one-out cross-validation,* esclude un individuo dalla valutazione complessiva dei risultati del gruppo analizzato. A partire dagli altri partecipanti, i ricercatori generano un modello che preveda un particolare risultato medico o relativo all'apprendimento. Il modello prevede un risultato per l'individuo escluso, poi l'intero processo si ripete per ciascun partecipante allo studio, con l'obiettivo di costruire un modello più efficace nel guidare la selezione della cura per ogni nuovo paziente. Uno standard così alto è stato raggiunto finora soltanto da pochi studi, ma bisogna avere un simile livello di rigore se si vuole davvero usare l'imaging cerebrale come tecnica predittiva.

L'imaging con risonanza magnetica è promettente ma è anche fonte di numerose controversie sulla sua applicabilità

Un'altra barriera è rappresentata dai costi e dalla disponibilità delle attrezzature per l'imaging cerebrale con risonanza magnetica. Ogni calcolo economico deve tenere in conto il costo della procedura, che può essere dai 500 ai 1000 dollari all'ora, e bilanciarlo con la prospettiva di sostenere i costi dei medici e delle visite ospedaliere, della perdita di produttività nel lavoro e delle risorse speciali da mettere in campo per gli studenti che restano indietro. In alcuni casi la risonanza magnetica potrebbe essere sostituita da altre metodologie, prendendo in prestito ciò che è stato imparato con la tecnica più costosa. L'elettroencefalografia, che misura l'attività elettrica del cervello, potrebbe per esempio essere adattata in modo da sostituirsi alla MRI in certi tipi di test.

Come emerge in due studi recenti, l'imaging con risonanza magnetica è tanto promettente quanto una potenziale fonte di controversie. Joseph Piven, dell'Università del North Carolina a Chapel Hill, ha usato l'fMRI su 59 lattanti di sei mesi per individuare un rischio particolarmente alto di incorrere in disturbi dello spettro autistico. Raramente le difficoltà sociali e comunicative caratteristiche dell'autismo emergono alla nascita; tipicamente sono identificabili soltanto verso i due anni di età, grazie a un'attenta valutazione. Studi di imaging sull'attività dei network cerebrali condotti su lattanti di sei mesi consentono di prevedere correttamente 9 degli 11 individui che, 18 mesi più tardi, avranno una diagnosi di autismo. I dati, in aggiunta, stabiliscono che gli altri 48 lattanti non riceveranno alcuna diagnosi di questo tipo. Si tratta di una previsione che, un giorno, potrebbe tranquillizzare i genitori i cui bambini non svilupperanno disturbi dello spettro autistico e, allo stesso tempo, potrebbe essere d'aiuto nella ricerca di interventi tempestivi per i bambini ad alto rischio.

Un altro studio predittivo ha cercato di accumulare prove a sostegno del fatto che l'impulsività è un importante fattore di rischio per la tendenza alle recidive. Quando si tratta di prendere decisioni relativamente alla libertà su cauzione, alla durata di una condanna detentiva e alla libertà vigilata, i consigli degli esperti valgono fino a un certo punto; una misura dell'attività cerebrale legata all'autocontrollo potrebbe aiutare a risolvere questo limite.

Kent Kiehl, professore di psicologia, neuroscienze e legge all'Università del New Mexico, ha esaminato l'attività del cervello durante un compito legato al controllo degli impulsi in 96 detenuti maschi prima dell'uscita di prigione; ha poi seguito i partecipanti per diversi anni. Mentre il loro cervello era oggetto di scansione, i detenuti svolgevano un compito destinato a rendere difficile il controllo degli impulsi. Dovevano premere un bottone quando il carattere «X» compariva ripetutamente sullo schermo di un computer. Allo stesso tempo, dovevano resistere alla tentazione di premere il bottone le rare volte in cui compariva invece la lettera «K». Si creavano così due impulsi contrastanti, a seconda di ciò che mostrava lo schermo.

Il compito svolto in laboratorio ha aiutato a prevedere ciò che sarebbe successo agli uomini una volta usciti di prigione. La probabilità che un ex carcerato fosse nuovamente arrestato nei quattro anni successivi raddoppiava per quei criminali con minore attività nella corteccia cingolata anteriore, regione del cervello connessa al controllo cognitivo e alla gestione di impulsi conflittuali. Le scansioni cerebrali hanno aiutato a prevedere i nuovi arresti meglio dei soli indicatori convenzionali come, per esempio, i punteggi in test di psicopatia, l'età o un abuso di sostanze di vecchia data. Una seconda analisi dei dati, non pubblicata, condotta da Russ Poldrack, oggi alla Stanford University, suggerisce che la forza di queste previsioni si abbassa notevolmente quando i risultati sono applicati a popolazioni di carcerati diverse da quella studiata (affermazione in parte confutata da Kiehl e colleghi).

Tutti questi studi fanno sorgere una serie di problemi cruciali. Quanto dovrebbe essere accurata una previsione per migliorare le cure sanitarie e le pratiche educative? Come corollario, le previsioni fatte sulla base di scansioni cerebrali come possono aiutare le persone evitando di limitarne le opportunità a scuola o sul lavoro? Se riuscissimo a proiettare meglio nel futuro le condizioni di salute mentale, le difficoltà nell'apprendimento o addirittura le attività criminali, come potremmo assicurarci, come società, che simili previsioni non giustifichino politiche punitive ma promuovano piuttosto il benessere individuale?

Ironicamente, più precise diventano le previsioni più emerge il bisogno di una struttura morale che consenta di usare queste conoscenze in modo saggio. ■

PER APPROFONDIRE

Dyslexia: A New Synergy between Education and Cognitive Neuroscience, Gabrieli J.D.E., in «Science», Vol. 325, pp. 280-283, 17 luglio 2009.

Toward Clinically Useful Neuroimaging in Depression Treatment: Prognostic Utility of Subgenual Cingulate Activity for Determining Depression Outcome in Cognitive Therapy across Studies, Scanners, and Patient Characteristics, Siegle G.J. e altri, in «Archives of General Psychiatry», Vol. 69, n. 9, pp. 913-924, settembre 2012.

Prediction as a Humanitarian and Pragmatic Contribution from Human Cognitive Neuroscience, Gabrielil J.D.R. e altri, in «Neuron», Vol. 85, n. 1, pp. 11-26, 7 gennaio 2015.

Come fare un bambino che impara di più, Stix G., in «Le Scienze», n. 518, ottobre 2011.

BIOLOGIA

L'evoluzione del

La nascita della musica è ancora un mistero per gli scienziati. Tuttavia studi sul campo e in laboratorio suggeriscono che la nostra biologia può spiegare la creazione di sistemi musicali

di Andrea Ravignani, Cinzia Chiandetti e Marco Gamba

ritmo

IN BREVE

Nonostante secoli di discussioni e ipotesi scientifiche, i ricercatori sanno poco di come, perché e quando i comportamenti musicali siano apparsi nella nostra specie.
Studi di paleoantropologia comparata suggeriscono che modulazione della voce e percussioni siano state le prime forme di espressione musicale. Inoltre, studi sulle vocalizzazioni di primati non umani indicano nelle capacità cognitive della nostra specie l'elemento chiave per spiegare la nascita della musica.
Un esperimento di uno degli autori ha dimostrato anche che la biologia umana può spiegare la creazione di sistemi musicali. Nel corso dell'esperimento, alcune persone prive di educazione musicale hanno involontariamente trasformato sequenze di battiti casuali in strutture ritmiche.

Andrea Ravignani è *Marie Curie Fellow* al Sealcentre di Pieterburen, nei Paesi Bassi, dove studia ritmo e apprendimento vocale nei mammiferi marini, in particolare nei cuccioli di foca, ed è *visiting researcher* al Max-Planck-Institut für Psycholinguistik di Nimega, sempre nei Paesi Bassi, dove effettua esperimenti di ritmo musicale confrontando diverse culture umane.

Cinzia Chiandetti è ricercatrice all'unità di psicologia «Gaetano Kanizsa» del Dipartimento di scienze della vita dell'Università di Trieste, dove insegna neuroscienze cognitive e cognizione animale e studia le origini biologiche delle preferenze musicali in varie specie animali.

Marco Gamba è ricercatore confermato al Dipartimento di scienze della vita e biologia dei sistemi dell'Università di Torino. È docente dei corsi di eto-ecologia umana, evoluzione del comportamento e tecniche e metodi dell'etologia. Studia il comportamento e i segnali acustici di numerose specie attraverso metodi quantitativi.

La musica è un mistero biologico ed evolutivo. Persone di tutto il mondo dedicano tempo ad ascoltare e produrre musica. Che provenga da un lettore portatile, sia ballata in una milonga di Buenos Aires o accompagni un rito iniziatico in Mali, la musica permea la nostra vita. Se gli esseri umani dedicano tanto tempo alla musica, e la musica è diffusa in tutto il mondo e in tutte le epoche, allora deve essere importante per la nostra specie. E qui il mistero: dopo secoli di discussioni e ipotesi scientifiche, ancora sappiamo poco di come, perché e quando siano apparsi comportamenti musicali nella nostra specie.

Portavoce ritmici. Suonatori di tamburi in Burundi; il ritmo del loro suono veicola messaggi ben precisi, come fossero dei portavoce.

I comportamenti umani non lasciano fossili di per sé. Questo rende lo studio delle radici evolutive di musica e linguaggio particolarmente difficile e affascinante allo stesso tempo. Un potente approccio per ricostruire le origini della musica è però il metodo comparativo, in cui attitudini e capacità musicali sono testate con metodo empirico, alla ricerca di somiglianze e differenze fra culture umane, fra singoli individui e fra esseri umani e altre specie animali. Da un lato, le somiglianze nei comportamenti musicali fra culture umane contribuiscono a definire che cos'è la musica. Per esempio tutte le musiche del mondo hanno una struttura ritmica, e il ritmo è spesso associato a movimenti e danza. Dall'altro lato, differenze tra esseri umani, o comportamenti musicali ristretti solo a un piccolo gruppo di culture umane, evidenziano tutto ciò che non è al cuore delle nostre capacità musicali come specie.

Lo stesso vale per le somiglianze fra musica e comportamenti simili in altri animali: tutti quei comportamenti tanto estesi da abbracciare tante altre specie di mammiferi sono essenziali a definire proprietà musicali che non sono strettamente umane. Queste considerazioni suggeriscono due casi interessanti per il biomusicologo, cioè lo scienziato che studia la musica da un punto di vista biologico ed evolutivo. Uno è quello degli universali musicali, ovvero strutture ritmiche e melodiche che si riscontrano in pressoché tutte le musiche del mondo (*si veda il box nella pagina a fronte*). L'altro caso è quello di comportamenti musicali comuni nell'essere umano che però si trovano solo in poche specie animali. Esempi sono i cori coordinati dei lemuri *Indri indri* (*si veda il box a p. 80*) o le sequenze di percussioni anfibie delle foche. Assieme, questi due approcci possono svelare le origini della musica, tanto le sue radici animali quanto le caratteristiche comuni presenti in ogni essere umano.

Quali sono stati allora i primi passi verso la musicalità nell'essere umano? Studi di paleoantropologia comparata suggeriscono che la modulazione della voce e le percussioni siano state le prime forme di espressione musicale. Vale quindi la pena approfondire questi due aspetti: modulazione vocale e comportamenti percussivi ritmici.

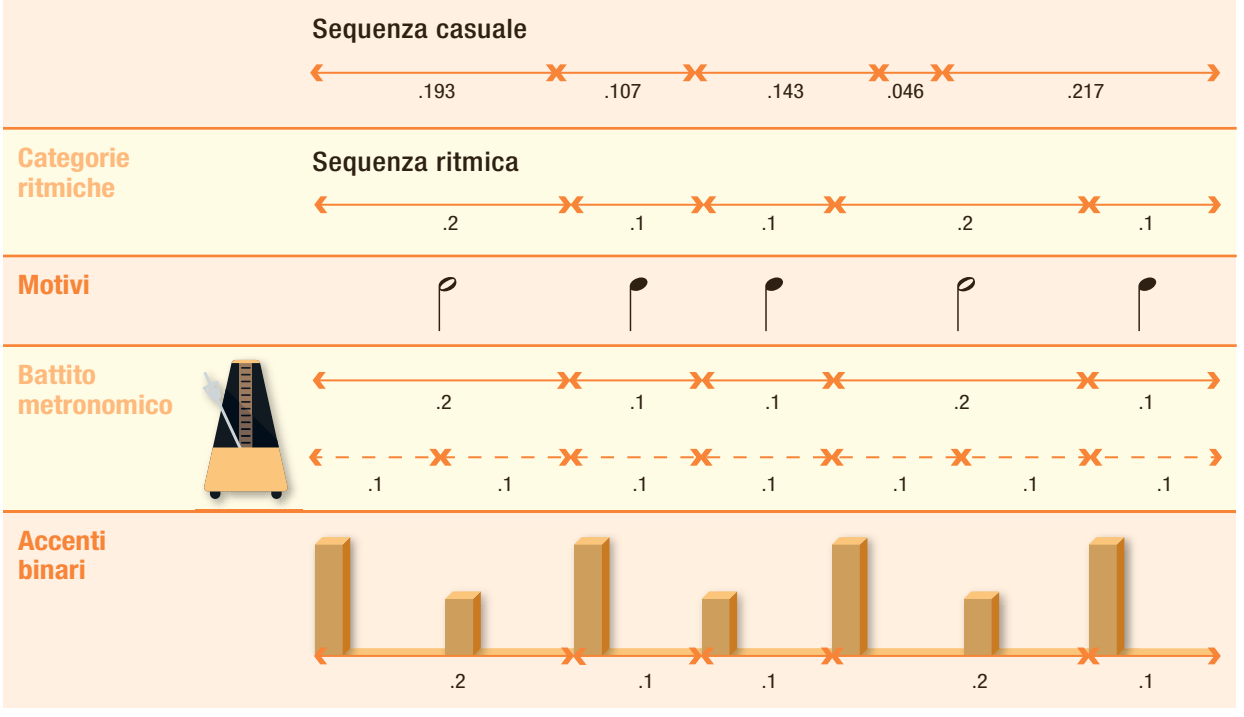
Musica e linguaggio

Prendiamo il contorno melodico del nostro parlato, o prosodia. Moduliamo le frasi con la voce, il nostro personale strumento musicale, per veicolare significati ed emozioni precisi. Un suono secco fermerà l'azione, una modulazione ascendente inciterà

Umkehrer/Getty Images (*pagine precedenti*); Bruno De Hogues/Getty Images

Gli universali ritmici

Ricercatori di musicologia comparata hanno analizzato musiche di tutto il mondo, trovando un ristretto numero di caratteristiche simili che ricorrono in tutte le culture umane, i cosiddetti universali musicali. Questi universali sono proprietà, per esempio ritmiche, che permettono di distinguere una sequenza di durate casuali (*in alto*) da una sequenza ritmica (*in basso*). Le linee rappresentano durate temporali e ogni «X» marca la fine di un intervallo (la cui durata in secondi è annotata in basso) e l'inizio del seguente.
Le sequenze ritmiche devono: essere composte da battiti separati da durate categoriche (per esempio molto breve, breve, lungo e molto lungo) anziché durate che possono assumere qualsiasi valore (*1*); formare motivi, cioè pattern di durate che si ripetono (*2*); indurre un senso di isocronia, cioè essere strutturate attorno a un battito regolare, che è un processo cognitivo, non fisico, e pertanto indicato da una linea tratteggiata (*3*); essere strutturate secondo accenti binari (*figura*) o ternari, alternando suoni più forti a suoni più deboli (*4*). Altri universali riguardano aspetti più melodici ed emotivi dei suoni.



una risposta, mentre una discendente consolerà, calmando. Accenti, pause, ritmo, timbro, altezze dei suoni sono alcune caratteristiche, tra le altre, riscontrabili nel cosiddetto *motherese* o *baby-talk* con cui ci rivolgiamo ai nostri bambini soprattutto prima che inizino a parlare per comunicare con noi. Nei vari paesi del mondo, le popolazioni usano queste regole in modo simile ma con alcune variazioni linguistiche locali, e le stesse sono anche alcuni degli *escamotage* adottati dai compositori nelle loro opere musicali per suscitare emozioni attraverso il dialogo tra le voci dei diversi strumenti. Ma non solo.

Tutti noi usiamo inconsciamente queste regole di modulazione vocale anche con gli animali domestici, come cavalli e cani addestrati, affinché ci supportino in situazioni di lavoro. In modo abbastanza bidirezionale, riusciamo a riconoscere una gran varietà di richiami anche in specie che ormai oggi non vediamo di frequente nei cortili di casa: «Il verso monosillabico, caratteristico di molti uccelli nidifughi, suona straordinariamente lamentoso ed è assai commovente. [...] Allora io feci un lieve movimento e subito il pianto si placò: l'ochetta mi corse incontro col collo proteso, salutandomi con un "vivivivi"», scrive l'etologo austriaco Konrad Lorenz in *Io sono qui tu dove sei?* (1988), parlando dell'ochetta Martina. E ancora: «Quando i pulcini di pollo cominciano a mangiare, poco dopo essere sgusciati dall'uovo, si ode un suono in cui il breve "pip" emesso all'atto di beccare si trasforma, assumendo un tono di poco più basso che lo muta in un "puit-puit" [...] emesso raccogliendo e mangiando del cibo particolarmente gustoso».

La capacità intra- e inter-specifica di attribuire un significato alla melodia del «parlato» non ci dovrebbe stupire molto se consideriamo, come ci aveva fatto notare Charles Darwin, che almeno le emozioni primarie (che per lo psicologo statunitense Paul Ekman sono gioia, rabbia, paura, tristezza, disgusto, sorpresa) sono riconoscibili a partire da specifiche posture e posizioni. Questi sono chiari indizi visivi che aiutano a decidere se avvicinarci o meno a un certo individuo, indipendentemente dalla mediazione dei fattori culturali. Molta informazione scorre lungo entrambi i canali, quello visivo e quello uditivo, integrandosi in una rappresentazione più efficace nel gioco delle interazioni sociali.

Gli studi comparati ci dicono che il processo che controlla comportamenti percussivi nei macachi coinvolge le stesse regioni cerebrali interessate dall'emissione dei richiami vocali, la parte caudale della corteccia uditiva e l'amigdala, che nell'essere umano servono a decifrare lo stato emotivo di chi parla. Ovvero, come un

Danilo Sossi (*su indicazione degli autori*)

Dal caos all'armonia in laboratorio

Nell'esperimento di uno di noi (Ravignani), proprio come nel gioco del telefono senza fili, ogni soggetto sperimentale ascolta e riproduce la sequenza ritmica suonata dal partecipante precedente. Ogni partecipante ascolta 32 sequenze, che passano attraverso otto «generazioni» di partecipanti, formando «catene» ritmiche. La differenza sostanziale fra l'esperimento e il gioco è che le sequenze iniziali ascoltate dal primo partecipante di ogni catena sono aritmiche, generate in modo casuale da un computer (*a sinistra*). Inoltre, nell'esperimento misuriamo proprietà quantitative delle sequenze, per testare statisticamente se convergono verso universali ritmici, cosa che in effetti è stata osservata.

macaco percepisce eccitazione o agitazione nelle percussioni di un compagno, noi percepiamo tristezza o rabbia nel parlato o in un brano musicale. Se prosodia e musica facciano capo a due sistemi separati o a un unico sistema con meccanismi comuni, non lo possiamo ancora dire con certezza. Sappiamo che c'è una facilitazione in chi parla lingue tonali (come il cinese mandarino tra le lingue asiatiche o l'igbo tra quelle africane) a distinguere tra le frequenze musicali e che la percezione di intonazione e ritmo fanno parte tanto della musica quanto del linguaggio, al punto che possono essere presi come componenti di base su cui intervenire in caso di disturbi specifici del linguaggio nello sviluppo.

Darwin annoverò le capacità musicali umane tra le nostre doti più misteriose. Ipotizzò, fin dal suo secondo libro *L'origine dell'uomo e la selezione sessuale* (1871), che «l'uomo primitivo, o meglio alcuni dei primi progenitori di esso» producessero cadenze musicali simili a quelle dei gibboni. Questi canti, secondo Darwin, generazione dopo generazione, dovevano aver assunto la capacità di esprimere emozioni varie come «l'amore, la gelosia, il trionfo, venendo anche adoperate per sfidare i rivali». Da queste emissioni articolate e dall'imitazione delle medesime si sarebbero via via affinate le capacità cognitive e imitative dell'essere umano, e successivamente avrebbero avuto origine i vocaboli e la composizione di una forma primitiva di linguaggio.

Questa teoria darwiniana venne battezzata come «protolinguaggio musicale» e da un paio di decenni, con il procedere di nuove indagini comparative sulle abilità musicali di altre specie rispetto a quella umana, è tornata a riscuotere una certa popolarità tra gli scienziati del linguaggio. L'intuizione di Darwin cristallizzò l'ipotesi che i primi *Homo sapiens*, o i loro antenati recenti, fossero diventati musicali ancora prima che linguistici.

La proto-musica degli altri

È naturale tornare alle parole di Darwin in *L'origine dell'uomo e la selezione sessuale* per capire quali specie possano costituire un riferimento privilegiato per l'indagine delle capacità musicali negli animali. Tra questi ci sono certamente i primati che producono emissioni vocali assimilabili al canto.

Già Darwin annoverò le capacità musicali degli esseri umani tra le doti più misteriose della nostra specie

Ritmo urbano. Un'esibizione degli Stomp (*a fronte*), un gruppo di musicisti e ballerini che usano oggetti quotidiani per creare ritmi e coreografie.

Darwin era stupito dal fatto che i gibboni potessero produrre canti modulati in frequenza al punto da coprire un'intera ottava, in grado cioè di far vibrare le proprie corde vocali a una determinata frequenza, ma anche al doppio della medesima. L'estensione è tradizionalmente un'indicazione importante della flessibilità comunicativa di una specie. La produzione vocale umana, per esempio, può essere caratterizzata da suoni che variano dal parlato grave, a circa 70 hertz, fino a un massimo di 1500 hertz se consideriamo il canto. Tuttavia, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, l'emissione di canti è una caratteristica di poche specie di primati. Solo il 7 per cento dei primati canta: 16 specie della famiglia Hylobatidae, cioè gibboni e siamanghi (appartenenti ai generi *Hoolock*, *Hylobates*, *Nomascus* e *Symphalangus*), la specie di lemuri *Indri indri* (appartenenti alla famiglia Indriidae), cinque specie del genere *Tarsius* e almeno sette specie del genere *Callicebus*.

La distribuzione geografica di questi primati si estende su tre continenti: i tarsi e i gibboni nel Sudest asiatico, i callicebi in Sud America, gli indri nel Madagascar nord-orientale. La distanza filogenetica tra le specie di primati che cantano, che esprime quanto la storia evolutiva di una specie differisca da un'altra, ha portato i ricercatori a ritenere che l'emissione di canti sia il risultato di un'evoluzione convergente; che non fosse cioè presente in un antenato comune ma si sia evoluta indipendentemente nelle diverse specie sotto l'effetto di pressioni selettive simili. Le conoscenze attuali ci permettono di dire che tutte le specie di primati che cantano hanno un'organizzazione monogamica dal punto di vista sociale. I gruppi sociali consistono solitamente di una cop-

Danilo Sossi (*su indicazione degli autori*)

ZUMAPRESS.com/AGF

pia adulta e della loro prole. Una seconda caratteristica distintiva di gran parte delle specie di primati che cantano è una spiccata territorialità. Sia i gruppi di gibboni sia quelli di indri vivono in territori esclusivi che sono attivamente difesi dall'intrusione di conspecifici. Un ruolo chiave nella regolazione della distribuzione degli animali nel territorio è svolto dall'emissione dei canti che mostrano caratteristiche acustiche differenti al variare del contesto in cui vengono emessi (annuncio della presenza nel territorio, scontro tra gruppi che vivono in territori limitrofi, richiamo di un individuo che si sia allontanato dal resto del gruppo).

Le vocalizzazioni dei primati non umani e di molti altri mammiferi sono prodotte con un meccanismo fonatorio paragonabile a quello usato dall'essere umano. La nostra voce è il risultato di un primo processo che avviene a livello laringeo, dove la vibrazione delle corde vocali genera un segnale che gli studiosi chiamano «sorgente». Il segnale prodotto dalle corde vocali risuona poi nel condotto vocale sopra-laringeo, cioè al di sopra della laringe, attraversando cavità come faringe e bocca. Le caratteristiche di queste cavità, il cui volume relativo può essere modificato attraverso i movimenti della lingua o il grado di apertura delle labbra, impongono modifiche al segnale laringeo, attenuando l'energia di alcune componenti di frequenza e lasciando immutata o aumentando quella di altre. Questo secondo passaggio del meccanismo fonatorio fu indicato nel 1960 da Gunnar Fant, allora professore di fonetica al Royal Institute of Technology di Stoccolma, come «filtro».

La teoria «sorgente-filtro», che un tempo si pensava applicabile solo alla fonazione umana, è quindi diventata via via uno strumento irrinunciabile nell'interpretazione delle emissioni vocali di altre specie, in particolare dei primati non umani. Secondo questo quadro interpretativo, la diversa anatomia degli organi della fonazione non sembra responsabile delle differenze di comunicazione tra l'essere umano e gli altri primati. Con l'apparato vocale che hanno, i primati potrebbero quindi produrre molti più suoni di quanti ne producano in natura. Le capacità cognitive sarebbero invece l'elemento chiave per spiegare come nell'essere umano si sia evoluto un sistema linguistico complesso, articolato e piuttosto unico.

Le componenti innate

Ascoltando un brevissimo estratto di vocalizzazione umana siamo in grado di attribuire molte caratteristiche alla persona che sta parlando, dal suo genere al suo stato emotivo. In questo senso, si fa strada una sorta di razionale biologico per alcuni aspetti più prettamente estetici della musica. Prendiamo la consonanza. Già a pochi mesi di vita i bambini prediligono i suoni consonanti, cioè quegli intervalli o linee melodiche che, anche da adulti, descriviamo come gradevoli, per contrasto con quelli dissonanti, che ci «suonano» incompleti o stridenti. Se Arnold Schönberg e Igor' Stravinskij non avessero osato rompere gli schemi musicali consonanti che andavano per la maggiore nelle composizioni dell'epoca, agli inizi del Novecento, forse non ci saremmo accorti che un aspetto che rende attraente una composizione è anche una costruzione mai scontata, non facilmente anticipabile. Spingendo la musica alla tensione e al conflitto, Schönberg e Stravinskij hanno anche mostrato che molto di quello che musicalmente ci piace dipende dall'esposizione a un certo modello.

Il canto dei lemuri nella foresta pluviale

L'*Indri indri* è una delle specie bandiera del Madagascar, al largo della costa sud-orientale dell'Africa, una delle aree che ospitano il maggior numero di specie animali e vegetali che non si trovano in altre parti del mondo; inoltre indri mostra numerose peculiarità. Tra i lemuri, è la specie di maggiori dimensioni, raggiungendo circa 8 chilogrammi di peso e, contrariamente agli altri lemuri, non ha una lunga coda, ma solo un moncherino di pochi centimetri.

Ma coloro che hanno la fortuna di inoltrarsi nelle regioni nord-orientali della foresta pluviale del Madagascar sono in grado di scoprire la più stupefacente particolarità di questa specie: indri è l'unico lemure a produrre canti. Questi canti sono emissioni sonore di elevata pressione acustica (raggiungono 110 decibel a 50 centimetri, un livello di pressione acustica simile a quello che possiamo percepire quando ci troviamo in aeroporto) e di solito sono prodotte da tutti gli individui adulti e subadulti di un gruppo. I gruppi sono costituiti da una coppia riproduttiva e dalla propria prole, fino a un massimo di sei esemplari.

Durante il canto, la femmina riproduttiva emette il maggior numero di note. Sulle sue emissioni si inseriscono, talvolta sovrapponendosi, gli altri individui del gruppo. Le unità sonore sono organizzate in frasi e mostrano un chiaro dimorfismo sessuale. I maschi emettono unità di durata maggiore rispetto a quelle emesse dalle femmine, ma in numero in genere minore. Durante il canto possiamo osservare diverse tipologie di unità: il canto inizia con i *roar*, vocalizzazioni roche che richiamano l'attenzione degli individui del gruppo; poi troviamo le «note lunghe» che, soprattutto nei maschi, hanno una durata maggiore di ogni altra unità; infine notiamo le frasi discendenti, costituite da un numero variabile di unità, tra 2 e 6, di frequenza decrescente.

Il canto svolge un ruolo importante nel mantenimento della posizione spaziale dei gruppi nella foresta, regolando in modo straordinariamente puntuale l'occupazione esclusiva di un territorio per ognuno dei gruppi sociali. Nella rara occasione che due gruppi si incontrino ai confini del proprio areale, la disputa si effettua principalmente attraverso emissioni sonore, e solo in rare occasioni avvengono aggressioni fisiche. Si pensa inoltre che il canto possa avere un ruolo nella formazione di nuove coppie e quindi di nuovi gruppi sociali.

C'è la possibilità, però, che la cultura operi su preferenze che sono date alla nascita, quindi che hanno avuto un significato e un'origine evolutiva diversa. Nel tentativo di capire se la preferenza per le armoniche (l'amalgama di frequenze che si sommano a quella fondamentale) consonanti possa definirsi innata, sono state percorse diverse strade. Registrando le risposte cerebrali dei neonati in seguito all'intrusione delle dissonanze in un insieme melodico consonante, si è visto che il cervello si accorge di questa violazione tonale in modo spontaneo già a poche ore dalla nascita. Tuttavia, anche l'esposizione prenatale può aver già modulato la preferenza dei neonati se consideriamo che i bimbi vengono al mondo con un'idea chiara su quale sia la voce della mamma, per esempio, o quale fosse la melodia che lei cantava loro nelle ultime fasi della gestazione. L'effetto dell'esposizione a un certo tipo di musica è stato controllato anche intervistando adulti di diverse culture più o meno esposti alla consonanza, spingendosi fino a popolazioni tribali africane e amazzoniche. La maggior parte delle persone ha riferito di preferire comunque i suoni consonanti e, risultato ancora più rilevante, nessun gruppo ha indicato la dissonanza come alternativa preferibile.

Ovviamente, i meno esposti ai diversi generi musicali e alla loro composizione più o meno consonante sono gli animali non umani, che non possono valutare su una scala il grado di piacevolezza dello stimolo ma potrebbero reagire diversamente all'ascolto delle versioni delle melodie consonanti e dissonanti. I risultati di esperimenti del genere non sono stati lineari, forse anche per l'eterogeneità di risposte codificate e di stimoli impiegati. Ma pulcini appena usciti dall'uovo, prima che possano udire suoni complessi, non hanno avuto dubbi e hanno avvicinato il compagno sociale che «pigolava» consonante.

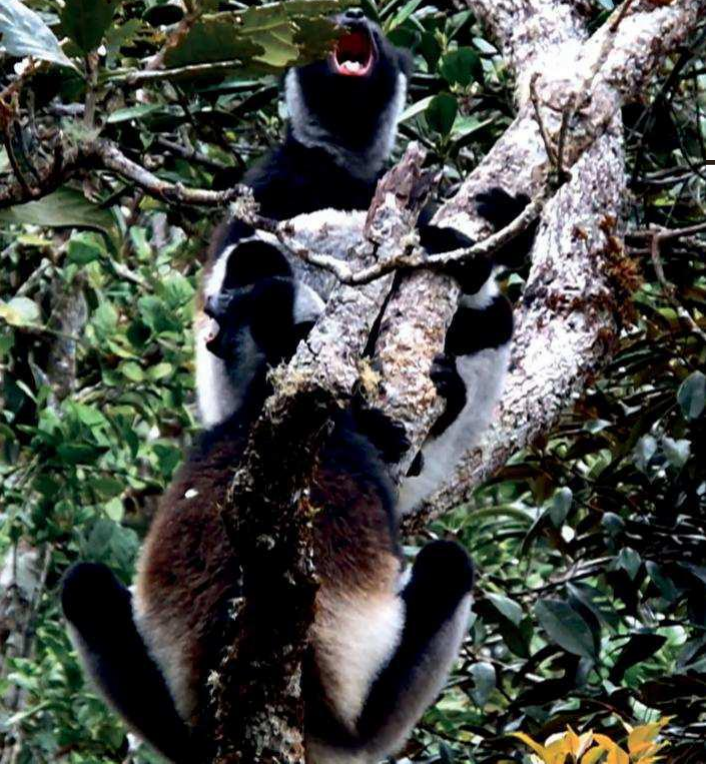
Uno stratagemma ingegnoso si è rivelato comporre musica *ad hoc* per piccole scimmie chiamate tamarini e per gatti partendo dai vocalizzi specie-specifici. Le reazioni da parte degli animali erano in linea con lo stato emotivo evocato dai brani anche negli esseri umani: gli animali si calmavano quando i vocalizzi di pacificazione erano modulati in tempi più lenti e all'interno di moduli consonanti. In natura, poi, sono stati registrati uccelli che si esibiscono in veri e propri «canti consonanti», in cui cioè gli intervalli consonanti predominano; e, insospettabilmente, un'analisi della frequenza del ronzio delle zanzare ci ha svelato che si uniscono nell'accoppiamento quando la frequenza del maschio e della femmina si assesta sull'unisono.

Da un punto di vista biologico, quindi, c'è qualcosa di estremamente sociale in questa caratteristica così basilare dell'organizzazione dei suoni: non a caso, quando le persone sono in accordo parlano «consonante» e quando invece sono in disaccordo i loro dialoghi diventano dissonanti. La consonanza sembra fondamentale nelle interazioni affiliative e di pacificazione, e la funzione biologica di base potrebbe essere quella di dirigere l'attenzione sulle fonti sonore che più probabilmente corrispondono a un altro essere animato. Quanto discusso finora suggerisce che i vocalizzi, umani e di altre specie, abbiano a che vedere con il lato melodico della musica. Al contrario, le predisposizioni percussive potrebbero costituire una chiave per capire l'evoluzione del ritmo.

Come nasce la musica

Quanto percepiamo del mondo esterno dipende ineludibilmente da come è costruito il cervello e la mente che ne deriva. Per la consonanza, sappiamo che eseguire un compito cognitivo (come riportare il colore di una sequenza di lettere, per esempio «VERDE» scritto in colore rosso) è già di per sé complicato, ed è ancora più difficile se come sottofondo c'è una melodia dissonante che crea appunto una «dissonanza cognitiva» che il sistema fa fatica a «mettere a posto» per concentrarsi sul compito. Anche il ritmo funziona come un principio di organizzazione generale: analizzare stimoli metrici ripetitivi genera una prestazione migliore in compiti di memoria. Una delle ragioni per cui esiste la metrica nelle poesie sembra proprio essere l'aiuto alla memorizzazione. E questo è vero anche per i pulcini. I sistemi cognitivi sembrano trarre beneficio da eventi strutturati nel tempo o raggruppati in modo da superare limiti di memoria a breve termine.

Tradizionalmente, l'evoluzione della musica è stata studiata con due approcci complementari ma raramente comunicanti. Ricercatori delle scienze umane hanno investigato come le proprie-



Cortesia Università di Torino

tà di sistemi musicali evolvono nel tempo. I biologi hanno invece cercato di capire come le capacità cognitive di fare musica siano emerse nei nostri antenati primati. Di recente uno di noi (Ravignani), insieme a colleghi dell'Università di Edimburgo, ha unito questi due approcci, mostrando che la biologia umana può spiegare la creazione di sistemi musicali. L'idea nasce da una semplice osservazione empirica: i sistemi musicali sono trasmessi in modo verticale, di generazione in generazione, e questo sistema di trasmissione culturale introduce variazioni e novità. Ma è possibile ricostruire questo processo in laboratorio? Per farlo, ci siamo ispirati a un gioco che probabilmente tutti abbiamo fatto in infanzia: il telefono senza fili.

Come nella versione originale, il telefono senza fili musicale consiste nell'ascoltare sequenze ritmiche prodotte da un'altra persona e riprodurle al meglio delle proprie possibilità (*si veda il box a p. 78*). Una riproduzione perfetta è però virtualmente impossibile. Quando si ascolta una sequenza ritmica, processi neurocognitivi del cervello umano introducono piccole distorsioni percettive. Allo stesso modo, provando a riprodurre un ritmo musicale, l'imitazione non può essere perfetta: limiti umani del sistema motorio, di memoria a breve termine e altro ancora introducono piccole variazioni nella struttura ritmica imitata. Se queste distorsioni fossero casuali, il telefono senza fili evolverebbe verso uno stato di caos. Invece, nel caso della musica, le distorsioni sono sistematiche e si vanno sommando di generazione in generazione, come abbiamo dimostrato: tanti gruppi di telefoni musicali, comunicandosi ritmi in parallelo, convergono con il tempo verso sequenze ritmiche strutturate. Sorprendentemente, questi ritmi generati in laboratorio acquisiscono tutte le sei proprietà strutturali che si trovano in tutte le musiche del mondo (*si veda il box a p. 77*). Tutto questo a partire da sequenze di battiti generate al computer, completamente casuali, e che nulla avevano di ritmico.

Questa ricerca, pubblicata su «Nature Human Behaviour», suggerisce che le strutture ritmiche della musica siano già insite nel cervello e nella biologia umana. Il processo di trasmissione culturale, qui il telefono senza fili, è però necessario a trasformare le piccole distorsioni cognitive in complesse strutture musicali.

Esseri umani senza addestramento musicale trasformano involontariamente sequenze di battiti casuali in strutture ritmiche. Che cosa ci insegna l'esperimento? Innanzitutto, che la divisione fra natura e cultura è una falsa dicotomia: sono più intrecciate di quanto la storia della scienza le abbia tradizionalmente dipinte. In particolare, l'esperimento dimostra che strutture ricorrenti in tutte le musiche del mondo sono riproducibili in laboratorio con esseri umani senza alcuna esperienza musicale. Anche nei casi in cui è poco esposto alla musica, il cervello umano ne contiene comunque, per così dire, le basi strutturali. Combinando la tendenza del cervello a regolarizzare e ricordare strutture con il processo di trasmissione culturale, sequenze ritmiche senza ordine sono trasformate in strutture che possono essere ricordate e trasmesse più agilmente, esattamente come accade nella vera musica.

Interpretando l'esperimento in chiave evolutiva, è possibile che a un certo punto i discendenti dei nostri antenati comuni con gli scimpanzé abbiano cominciato a produrre comportamenti percussivi o vocalizzi ritmici. Apprendendo l'uno dall'altro, e di generazione in generazione, i pattern suonati sono lentamente cambiati, fino a convergere verso gli universali ritmici.

Un futuro sorprendente

Lo studio biologico delle attitudini musicali, ovvero la biomusicologia, ha fatto passi da gigante negli ultimi anni. Molte scoperte hanno portato a rivedere concetti e dogmi finora dati per scontati. Prima di tutto non siamo la sola specie animale a essere musicale. Altri animali esibiscono comportamenti proto-musicali che sono una chiave per comprendere l'evoluzione della musicalità nella nostra specie. Inoltre, la classica divisione tra cultura e biologia va riconsiderata in maniera più organica. C'è un'interazione continua tra artefatti culturali, come la musica, e capacità biologiche e cognitive. Sistemi strutturati, come il ritmo musicale, sembrano emergere da un'interazione fra trasmissione culturale e predisposizioni biologiche degli individui.

Le scoperte degli ultimi anni hanno anche sollevato molte domande. Quali sono le pressioni evolutive che hanno dato origine ai cori degli indri o a comportamenti percussivi nelle foche? Come si relazionano con le ipotetiche pressioni che produssero i primi vocalizzi e percussioni musicali umani? Fino a che punto la musica cambia il cervello, e questi cambiamenti sono ereditabili dalla prole? A queste e a molte altre domande verrà data risposta da un campo di ricerca interdisciplinare, in continuo sviluppo tra discipline umanistiche, scienze sociali e bioscienze. Dopo secoli di congetture, la relazione fra musica, cervello ed evoluzione è diventata una disciplina scientifica rigorosa. Come dimostrato dai risultati degli ultimi anni, scoperte sorprendenti attendono i ricercatori che studiano le origini della musica, probabilmente il comportamento umano più diffuso e allo stesso tempo misterioso. ■

PER APPROFONDIRE

Chorusing, Synchrony, and the Evolutionary Functions of Rhythm. Ravignani A., Bowling D.L. e Fitch W.T., in «Frontiers in Psychology», Vol. 5, articolo 1118, 10 ottobre 2014.

Musical Evolution in the Lab Exhibits Rhythmic Universals. Ravignani A., Delgado T., e Kirby S., in «Nature Human Behaviour», Vol. 1, articolo n. 0007, 19 dicembre 2016.

The Evolution of Rhythm Cognition: Timing in Music and Speech. Ravignani A., Honing H. e Kotz S.A., in «Frontiers in Human Neuroscience», Vol. 11, n. 303, 13 giugno 2017.

Psicologia della musica. Schön D., Akiva-Kabiri L. e Vecchi T., Carocci, Roma, 2017.

Il morso

Un coccodrillo nuota nei Giardini della Regina, al largo della costa meridionale di Cuba.

EVOLUZIONE

Ricerche ad alto tasso di adrenalina sul morso dei coccodrilli e dei loro parenti rivelano i segreti del successo evolutivo di questo gruppo

di Gregory M. Erickson

più forte

IN BREVE

I coccodrilli e i loro parenti più stretti hanno dominato gli ambienti costieri per decine di milioni di anni.

Gli studi sulla biomeccanica dell'alimentazione nei coccodrilli di oggi hanno dato diverse indicazioni sul loro successo evolutivo.

Queste ricerche hanno implicazioni per la comprensione delle abitudini alimentari di altri animali, compresi i dinosauri.

Gregory M. Erickson è professore di anatomia e paleobiologia dei vertebrati presso la Florida State University. Studia la biomeccanica dell'alimentazione e i tassi di crescita nei rettili viventi e fossili.

In una torrida giornata estiva a Darwin, in Australia, mi trovai a tre metri da un coccodrillo marino, il più grande rettile del mondo; un maschio adulto lungo 5 metri e pesante mezza tonnellata. Mi fissava con inquietanti occhi felini mentre il torace si sollevava periodicamente per espirare un forte getto d'aria dalle narici, come una locomotiva che sbuffa vapore.

Forse, pensai, i miei colleghi e io stavamo spingendo la nostra ricerca oltre i confini del buonsenso. Avevo lavorato con i coccodrilli molte volte prima di allora, ma mai con uno così massiccio.

Mi trascinai verso di lui, armato solo di una manciata di strumenti elettronici e di un'asta in PVC lunga poco più di un metro con in cima un occlusometro, un dispositivo per misurare la forza del morso dell'animale. Mi avvicinai al coccodrillo di lato, arrivando a mezzo metro dalla sua testa. Quello, innervosito, aprì le fauci, mostrando 64 enormi denti aguzzi, e sibilò: un monito dantesco a non avvicinarmi. Era il mio segnale. Stringendo l'asta, infilai l'occlusometro nel fondo della bocca del coccodrillo. L'animale serrò all'istante le mascelle sul dispositivo con un tonfo sonoro, come il botto di un cannone. L'impatto quasi mi strappò l'apparecchio dalle mani. Poi ci fu solo silenzio.

Mi ripresi, e capii fino in fondo ciò che era appena successo. Il rettile era completamente immobile, io stavo bene e l'attrezzatura sembrava intatta. Con mia grande gioia, l'occlusometro era perfettamente incastrato tra i denti posteriori del coccodrillo. «Bel morso», dissi a Kent A. Vliet, il collega dell'Università della Florida che stava dietro di me con in mano l'amplificatore di carica che aveva registrato il risultato. «Che forza aveva?».

«Mille e seicentotrentasette chili!», rispose. Il team di ricerca e un gruppo di spettatori interessati cominciarono a bisbigliare sul numero mentre io mantenevo la presa sull'asta in attesa che il coccodrillo mollasse il contatore. Calata l'adrenalina mi resi conto che avevamo appena registrato la massima forza di morso mai documentata in un animale vivente.

Quell'afosa giornata australiana segnava il culmine di una serie di studi svolti insieme ai miei colleghi negli ultimi 17 anni per capire la biomeccanica dell'alimentazione in coccodrilli, gaviali, alligatori e caimani, un gruppo genericamente noto come Crocodylia. Questi animali hanno regnato come indiscussi predatori apicali negli ambienti costieri caldi di acqua dolce e di estuario per oltre 85 milioni di anni. Gli scienziati si sono chiesti a lungo quali fattori abbiano reso possibile un successo del genere. I nostri risultati aiutano a spiegare perché i moderni coccodrilli dominano questi habitat oggi, ma chiariscono anche in che modo i loro antenati preistorici sono diventati i signori delle rive.

Costruiti per uccidere

La ricca documentazione fossile dei coccodrilli mostra che la forma del corpo dietro la testa è rimasta in gran parte invariata per milioni di anni. Le dimensioni del corpo, invece, hanno fluttuato più e più volte, portando ripetutamente a nanismo (lunghezze inferiori ai 120 centimetri) e gigantismo (lunghezze superiori a 9 metri) nel corso dell'evoluzione. A questi cambiamenti nelle dimensioni corporee si sono accompagnate modifiche del muso e della forma dei denti. La chiave per comprendere una buona parte del successo del gruppo, dunque, consiste nel raccogliere informazioni su forma, funzione, efficienza e rilevanza per la dieta di queste caratteristiche.

Per fortuna le 24 specie viventi di coccodrilli, come i loro antichi predecessori, hanno una vasta gamma di dimensioni corporee, da 120 centimetri a 7 metri. I coccodrilli di oggi mostrano anche la stessa varietà di forme di muso che si osserva nei coccodrilli fossili. Gli scienziati hanno già determinato le diete che si associano alle varie forme di muso dei coccodrilli moderni. Nello specifico, hanno individuato generalisti dal muso medio e largo; forme dal muso sottile con denti ad ago specializzate per il consumo di piccole prede, inclusi i pesci; forme a muso largo e denti bulbosi, che si concentrano su prede difficili come i molluschi; e cacciatori semiterrestri, con un muso da cane. Gli studi sulla biomeccanica alimentare di questi animali in relazione a quello che mangiano in natura potrebbe dirci come questi straordinari predatori si guadagnano da mangiare oggi e allo stesso tempo aprire le porte alla comprensione del loro passato.

Quando abbiamo iniziato le nostre ricerche, tuttavia, lo stato della scienza era tale che la rilevanza biomeccanica del tipo di muso e di dentatura dei coccodrilli e della variabilità delle dimensioni corporee erano basate esclusivamente su speculazioni e su modelli, praticamente senza alcun fondamento empirico. C'erano diverse ragioni per questa mancanza di dati empirici. Molti dei coccodrilli del pianeta sono fortemente minacciati dalla caccia eccessiva, il che li rende di difficile accesso per gli scienziati. Inoltre sono animali pericolosi per chi li studia. Per di più non esisteva la tecnologia per determinare la forza del morso e la pressione dei denti, misurazioni essenziali per capirne la biomeccanica. Tutto questo era sul punto di cambiare.

Nel 2001 un produttore cinematografico di «National Geographic» mi chiamò per chiedermi se fossi interessato a determinare la forza del morso del cosiddetto «supercoccodrillo» *Sarcosuchus*, un parente estinto dei coccodrilli lungo 12 metri trovato in Niger da Paul Sereno, paleontologo dell'Università di Chicago. Risposi che avrei potuto farlo con esperimenti sulla forza del morso nei coccodrilli viventi, aggiungendo che però mi sarei dovuto assicurare di avere accesso agli esemplari. Contattai immediatamente Vliet, il consulente scientifico del parco zoologico St. Augustine Alligator Farm (SAAF) in Florida – l'unica struttura al mondo a ospitare le 23 specie di coccodrilli conosciute all'epoca – e proposi una serie di studi.

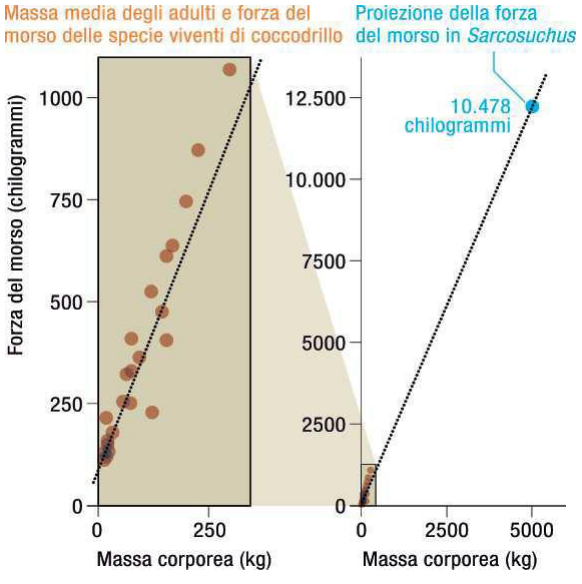
Per prima cosa volevo determinare la forza di morso e la pressione dei denti negli adulti di tutte le specie di coccodrilli attua-

Bernard radvAner/Getty Images (*pagine precedenti*)

FORZE A CONFRONTO

Campioni di morsi

Le diverse specie di coccodrilli presentano una vasta gamma di dimensioni del corpo e di tipi di muso. Gli esperti si aspettavano che le specie con un muso delicato avessero forza di morso minore e che quelle con musi più grossi avessero forza maggiore. Ma gli studi dimostrano che in realtà questi animali hannpo tutti la stessa impressionante forza di morso, in proporzione al loro peso. La stretta correlazione tra forza del morso e dimensioni corporee (*a sinistra*) ha inoltre consentito ai ricercatori di stimare la forza di morso delle specie fossili, tra cui *Sarcosuchus*, un parente dei coccodrilli lungo 12 metri (*a destra*).



Elaborazione grafica di Jen Christiansen. Fonte: *Insights into the Ecology and Evolutionary Success of Crocodilians Revealed through Bite-Force and Tooth-Pressure Experimentation*. Erickson G.M. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 7, n. 3, articolo n. e31781, 14 marzo 2012

li usando i campioni del SAAF. Quindi volevo confrontare i dati su alligatori in cattività con quelli raccolti in natura usando esemplari catturati dagli accalappiatori della zona e dai biologi della Florida Fish and Wildlife Conservation Commission (l'autorità per la conservazione dei pesci e della fauna selvatica della Florida) per vedere se avremmo potuto usare i dati di cattività per inferire i risultati in natura. Avevo anche intenzione di effettuare dissezioni dei muscoli ed esperimenti di stimolazione muscolare sugli alligatori per costruire un modello in grado di predire la forza mandibolare dei coccodrilli fossili, e di usare quei dati per capire le abitudini alimentari dei coccodrilli estinti e dei loro parenti, in particolare i dinosauri. Il proprietario del SAAF David Drysdale ci concesse gentilmente il permesso di fare i test, «National Geographic» stanziò i finanziamenti per la ricerca e iniziò la corsa per capire come raccogliere i dati prima che iniziassero le riprese.

Come si misura la forza del morso di un coccodrillo? Bella domanda. Non ne avevo idea. Nessuno l'aveva mai misurata direttamente in animali molto grandi, meno che mai in enormi coccodrilli carnivori. La mia sola esperienza di lavoro paragonabile era stata durante il dottorato, quando calcolavo la forza di morso di piccole lucertole usando piastre di metallo chiuse come pinzette collegate a indicatori che misuravano la forza necessaria per stringerle. Per affrontare questo problema molto più grande ricorsi all'aiuto di un ingegnere con cui avevo lavorato in precedenza alla Stanford University e di un progettista della Kistler, una società che produce trasduttori di forza, ossia dispositivi che rilevano la forza esercitata quando li si comprime, del tipo che si usa nei test su materiali industriali.

Insieme progettammo una serie di occlusometri portatili e resistenti all'acqua da usare con i coccodrilli. Somigliano a bilance da bagno in miniatura, ma sono molto più accurati, e costano fino a 11.000 dollari. Attaccammo una maniglia tubolare in PVC a ciascun dispositivo e lo collegammo a un amplificatore di carica portatile con un display che indica istantaneamente il valore. Inoltre rivestimmo le placche d'acciaio del trasduttore con molti strati di cuoio per imitare la sensazione di un vero animale da preda e per proteggere i denti dei coccodrilli. Questa si è rivelata una precauzione più importante del previsto, perché uno dei miei colleghi ha poi dimostrato che i rettili non mordono a piena potenza se il materiale con cui entrano in contatto i denti è eccezionalmente duro, proprio come una persona che mangia una caramella durissima.

Una volta disponibile la soluzione tecnologica, il passo successivo fu sviluppare un protocollo per lavorare sugli animali. Lavorai con Vliet, il mio collega esperto di coccodrilli, e con John Brueggen, direttore del SAAF, per formulare una strategia che potesse soddisfare gli obiettivi di ricerca riducendo al minimo lo stress per i soggetti di studio, in ottemperanza alle linee guida sul benessere animale. Quello che progettammo, e che miracolosamente funzionò fin da subito, comportava catturare al laccio i coccodrilli, che non sono abituati a essere maneggiati, nei loro recinti; trascinarli fuori grazie a un piccolo esercito di persone; immobilizzarli; liberare le mascelle, cosa che invariabilmente li portava ad aprirle; e infine collocare il misuratore sui denti posteriori, dove le forze mandibolari sono maggiori, per indurre e registrare un morso al massimo della forza.

Durante il test, un addestratore fermo dietro la schiena dell'animale doveva tenergli la testa dritta per evitare che rotolasse. Se l'animale avesse rotolato durante l'esperimento, i risultati non avrebbero mostrato solo il contributo dei muscoli mandibolari alla forza del morso, perché nella lettura sarebbero finiti anche la massa e l'inerzia del rettile. Dopo il test avremmo misurato e pesato gli animali. Di solito il peso di grandi animali non domestici non viene misurato. Noi ritenemmo però che fosse importante per il nostro studio perché ci avrebbe permesso di confrontare la forza del morso in proporzione al peso tra specie di coccodrilli con dimensioni molto varie, e di confrontare i dati sui coccodrilli con altri animali, a prescindere dalla forma del corpo.

L'intero processo di cattura e pesatura è un po' come un rodeo per scienziati, anche se una volta ho avuto una discussione con un professionista del rodeo che ha ammesso che non vorrebbe mai avere a che fare con un'impresa del genere, facendomi notare che «i tori, almeno, non si girano per mangiarti». Allo stesso modo, una volta ho catturato e raccolto dati su un alligatore di 4 metri insieme a Georges St-Pierre, probabilmente il più grande campione di arti marziali miste di tutti i tempi, che ha detto che è stata la cosa più spaventosa che avesse mai fatto e che i miei colleghi e io eravamo pazzi. A dire il vero, quelli di noi che lavorano a stretto contatto con quegli animali non lo considerano un lavoro particolarmente pericoloso. Ciò non toglie che davanti ai coccodrilli più grossi esitiamo anche noi, e anche quelli più piccoli possono staccare un braccio, se non si sta attenti. Come veterinari che lavorano con i cani, abbiamo imparato a leggere il comportamento dei coccodrilli e a maneggiarli senza causare danni né agli animali né a noi stessi. Le regole fondamentali sono di tenersi alla larga dalle parti appuntite ed evitare i bordi dell'acqua. I coccodrilli

sono incredibilmente furtivi – anche un esemplare di 5 metri può essere impercettibile nelle acque basse – e possono saltare fuori dall'acqua a rovinarvi la giornata.

Restava da risolvere un'ultima parte del protocollo di ricerca. La forza del morso è considerata come un valore affidabile per descrivere le prestazioni alimentari di un animale con i denti. Ma è solo una misura indiretta. Se lo scopo è valutare la capacità di un coccodrillo di cacciare con successo le potenziali prede che incontra all'interfaccia terra-acqua, il parametro più rilevante dal punto di vista biologico è la pressione dei denti. È questa che determina se i denti possono davvero affondare in un alimento composto da pelle, cuticola, conchiglia, osso e così via. Le pressioni prodotte dalla corona dei denti fanno sì che i tessuti cedano sotto lo sforzo di taglio, causando così incrinature o forature che si aprono con l'aumento della forza del morso, il che rende possibile l'uccisione immediata o consente un appiglio con cui trascinare la preda sott'acqua e affogarla.

Per stimare la pressione dei denti dopo ogni misura di forza del morso inserivamo una tavoletta nelle fauci dell'animale e gli chiudevamo la bocca col nastro adesivo. A quel punto infilavo la mano e facevo un calco con lo stucco dentale. La tavoletta serviva a bloccare i morsi che il coccodrillo avrebbe potuto dare come reazione di riflesso. Ma anche adesso, pur avendo fatto centinaia di calchi, questo compito mi fa sussultare: mettere le mani in bocca a un coccodrillo va contro tutti gli istinti umani fondamentali. Come ultimo passaggio usavamo i calchi per fare copie dei denti in laboratorio e misurare le aree di contatto sulle punte. Abbiamo poi diviso per questi valori la forza del morso per ricavare la pressione dei denti.

Caso aperto e chiuso. Gregory Erickson, l'autore, mentre misura la forza del morso di un alligatore.

Quello che abbiamo imparato nel corso dei nostri studi su più di 500 individui, rappresentanti di tutte le specie viventi di coccodrilli, capovolge parte delle credenze comuni su questi animali. Prima della nostra ricerca gli esperti si aspettavano grandi differenze nella forza di morso tra le specie di coccodrilli. Si credeva che quelli con muso delicato e denti acuminati, che si nutrono di prede piuttosto morbide come i pesci, avrebbero presentato una forza modesta, mentre per quelli con crani e denti robusti che sono in grado di spaccare ossa e molluschi ci si aspettava valori elevati. Abbiamo invece scoperto che tutti i coccodrilli possono generare forze di morso prodigiose. Le nostre analisi statistiche hanno rivelato che – con l'eccezione di una sola, il gaviale, predatore di pesci – tutte le specie presentano le stesse forze mandibolari, in proporzione al peso, a prescindere dal fatto che abbiano una dieta dura o morbida o se siano delicati o forti di muso. Quelli con i valori assoluti più alti (fino a 1700 chilogrammi) eclissano i valori misurati o stimati per mammiferi carnivori come iene maculate, leoni e tigri (circa 450 chilogrammi). Noi umani generiamo solo forze intorno ai 90 chilogrammi.

È curioso come ogni biologo di coccodrilli con cui ho parlato prima di condurre questo lavoro abbia detto che in natura gli alligatori – individui «rossi di zanne e d'artigli» e atletici perché costretti a lottare per l'esistenza nei loro habitat naturali – avrebbero mostrato prestazioni di forza superiori rispetto alle loro controparti in cattività spesso obese e letargiche. Abbiamo invece scoperto che, a parità di peso, mordono con la stessa forza. È stata una scoperta importante, perché ha dimostrato che i nostri dati sugli animali in cattività si possono usare per stimare le prestazioni di individui selvatici e che possiamo sfruttarli anche per calcolare le prestazioni nei coccodrilli fossili.

Da questi risultati abbiamo previsto la forza del morso per *Sarcosuchus* e per alcuni coccodrilli giganti estinti. I valori si aggirano sui 10.500 chilogrammi, paragonabili al peso di un autoarticolato. Dall'altra parte dello spettro abbiamo stimato la forza del morso anche per il più piccolo coccodrillo conosciuto: *Procaimanoidea*, lungo solo 75 centimetri e vissuto circa 40 milioni di anni fa. Il suo morso produceva solo 64 chilogrammi di forza. Paul Gignac, all'epoca mio dottorando e oggi professore al Center for Health Sciences dell'Oklahoma State University, ha recentemente usato questi dati per stimare le forze del morso durante l'evoluzione dei coccodrilli.

Decespugliatori rettiliani

I nostri risultati hanno diverse implicazioni evolutive. Per prima cosa mostrano che durante i loro 85 milioni di anni di dominio come guardiani dell'interfaccia terra-acqua i coccodrilli hanno mantenuto l'architettura dei muscoli che chiudono le mascelle. I risultati tracciano inoltre un nuovo quadro su come i coccodrilli hanno evoluto più volte le stesse forme di muso e denti e le corrispondenti caratteristiche ecologiche. In un certo senso sono un po' come i decespugliatori. Se si desidera più forza per i lavori in giardino bisogna passare a un modello con un motore più grande. I coccodrilli hanno ottenuto lo stesso effetto con l'evoluzione di dimensioni corporee maggiori. Per passare dal taglio di erba e cespugli a usi specializzati come rifinire il bordo dei marciapiedi o tagliare i rami degli alberi, bisogna cambiare l'accessorio. I coccodrilli si sono specializzati nello sfruttare diverse prede evolvendo «accessori» diversi, fatti di denti e mascelle.

I dati sulla pressione dei denti raccontano una storia complementare. Come le forze del morso, anche le pressioni dei denti dei coccodrilli non hanno eguali in qualsiasi altro animale vivente e aumentano con le dimensioni degli animali. I valori vanno da 1400 a 25.000 chilogrammi per centimetro quadrato, annientando il precedente record stimato di 1500 del gigantesco pesce fossile *Dunkleosteus*. I nostri risultati suggeriscono che il segreto delle diete eclettiche che hanno contribuito a rendere i coccodrilli un gruppo così vincente (nessuno di loro ha una dieta del tutto specializzata) è che ogni specie può infilzare i tipi di cibo che sono comuni nell'ambiente in cui vive. Le diverse forme di denti consentono semplicemente pressioni maggiori o minori in predatori più specializzati, il che contribuisce a una maggiore efficienza nell'infilzare prede più morbide come i pesci o sostenere l'impatto con ossa o conchiglie più dure.

Sapendo questo, io e i miei studenti abbiamo cominciato a dare un'occhiata più da vicino ai fattori che contribuiscono alla forza

Gregory M. Erickson

del morso. Nel 2010 Gignac ha esaminato i muscoli degli alligatori americani per sviluppare un mezzo per prevedere con precisione il contributo di ciascun muscolo alla forza del morso. Tutti i coccodrilli hanno quelli che a prima vista sembrano enormi muscoli del collo. Sono in realtà i cosiddetti pterigoidi mediali, alcuni dei muscoli coinvolti nella chiusura o adduzione delle mascelle. Nella maggior parte degli animali gli pterigoidi mediali sono piccoli e non contribuiscono granché alla forza del morso. Nei coccodrilli ne generano il 60 per cento.

Negli animali che hanno un morso potente di solito c'è un ingrossamento dei muscoli temporali, quelli che coprono le mascelle (sono i muscoli che si gonfiano sulle tempie quando stringiamo i denti). I coccodrilli invece hanno rimpolpato gli pterigoidi mediali, che si trovano sotto le mascelle e sporgono lungo i lati del collo. Perché? La risposta ha a che fare con il modo in cui cacciano. I coccodrilli sono straordinariamente bravi ad avvicinarsi di soppiatto alla preda e a catturarla in acque molto basse presso la riva. In genere si avvicinano alla preda facendo sporgere fuori dall'acqua ben poco della testa oltre le narici per respirare, gli occhi per vedere e le orecchie per sentire. Il resto del gigantesco corpo resta sommerso finché il predatore balza sulla preda ignara. Con gli adduttori della mascella nascosti sotto il pelo dell'acqua, i coccodrilli sono più furtivi di quanto sarebbero se avessero ingrossato i ben più vistosi muscoli temporali. Come sottomarini a quota periscopica, i coccodrilli tengono sopra l'acqua solo l'equipaggiamento di rilevamento necessario.

I coccodrilli si sono specializzati nella cattura di prede diverse evolvendo «accessori» diversi, fatti di denti e mascelle

Le analisi di Gignac sui muscoli coinvolti nel morso dei coccodrilli fanno luce anche su un altro enigma. Nei nostri primi test il gariale, mangiatore di pesci dal morso sottile e dai denti aguzzi, è risultato generare una forza mandibolare anomala. È inferiore alla media degli altri coccodrilli di qualcosa come il 50 per cento. Dissezionando uno degli animali, Gignac ha scoperto che gli pterigoidi mediali erano relativamente piccoli, ma i muscoli di chiusura della mascella superiore erano grandi per un coccodrillo. È un'organizzazione che favorisce la velocità della chiusura della mascella a scapito della forza del morso. Il nostro sospetto è che il gaviale, essendo la specie più piscivora tra i coccodrilli, abbia sacrificato la forza del morso in cambio di una cattura più rapida.

Questa linea di ricerca risolve un altro enigma. Durante i nostri test sul gigantesco coccodrillo marino australiano, l'animale ha tenuto la presa sul misuratore di forza per dieci minuti prima di mollarlo. Abbiamo scoperto che in queste situazioni il movimento del misuratore stimola una stretta che ha quasi lo stesso ordine di grandezza del morso iniziale, quello a pieno regime. Ho registrato personalmente 22 di questi episodi, e a volte ho dovuto aspettare 25 minuti per recuperare l'attrezzatura: si riprende il contatore quando lo vuole restituire il coccodrillo.

Questo ci ha incuriositi sul significato di questo comportamento e su come venga prodotto. Per scoprirlo abbiamo collegato un computer al nostro occlusometro e abbiamo registrato le forze durante gli esperimenti in campo sugli alligatori americani, scoprendo così che le forze di trattenimento erano circa il 10 per cento delle forze massime. Riteniamo che questo comportamento innato sia legato al modo in cui gli alligatori affogano le grandi prede. In natura, gli alligatori usano tipicamente un morso aggressivo per infilzare la preda e ottenere una presa salda con i denti. Quindi portano il loro pasto in acque più profonde e lo affogano. Se la preda oppone resistenza, gli alligatori riassestano i denti mordendo a piena forza. Con le sue dissezioni Gignac ha rivelato che queste capacità di presa e chiusura derivano da una notevole specializzazione fisiologica dei muscoli. Ha notato che i massicci muscoli che chiudono la mascella, che generano la maggior parte delle forze massime di morso, sono di colore bianco come i muscoli del petto dei tacchini, che possono generare brevi scatti potenti per il volo ma si stancano facilmente per la mancanza di un apporto di sangue. Ha quindi scoperto fibre muscolari ossidative rosse e intermedie per sostenere il comportamento di tenuta a forza minore. Sono simili alla carne scura che si trova nelle zampe dei tacchini, muscoli altamente vascolarizzati e ricchi di mioglobina per camminare a lungo. Il modello di Gignac mostra che, insieme, questi muscoli scuri fino ad allora ignoti generano il 10 per cento della forza del morso dell'alligatore, quel tanto che basta per tenere i denti serrati.

T. rex morde ancora

Il nostro lavoro serve a capire anche l'alimentazione di altri animali. Gignac e io abbiamo usato i dati per sviluppare il primo modello affidabile sulla forza del morso in *Tyrannosaurus rex*. Le stime precedenti usavano una varietà di modelli basati su alligatori, lucertole e persino mammiferi. Inutile dire che i risultati erano disparati, fluttuando tra 8150 e 113.400 chilogrammi. Al contrario il nostro modello, specifico per gli arcosauri – il gruppo che comprende coccodrilli, uccelli e i loro parenti estinti – ha prodotto un valore di circa 3600 chilogrammi. È il doppio di quello di cui sono capaci i più grandi coccodrilli di oggi. Inoltre la pressione dei denti di *T. rex*, 30.326 chilogrammi per centimetro quadrato, è la più alta mai stimata per qualsiasi animale. Sulla base di queste nuove stime, che abbiamo pubblicato nel 2017, abbiamo risolto il mistero di come il re dei dinosauri polverizzasse le ossa delle sue prede. Oggi riescono in questa impresa solo i mammiferi carnivori in cui i denti superiori e inferiori entrano in pieno contatto, ossia in occlusione, durante la masticazione.

I coccodrilli sono predatori magnifici e abbiamo fatto grandi progressi nel capire come lo sono diventati, ma molte domande restano senza risposta. È probabile, per esempio, che la forma del muso possa influenzare la forza del morso sott'acqua in modi diversi dalla terraferma. Ciò significa che dovremo ripetere i nostri test sott'acqua. È più facile a dirsi che a farsi: dobbiamo sviluppare nuovi occlusometri che funzionano anche immersi e lavorare con gli ingegneri per capire in che modo il flusso dell'acqua potrebbe influire sulla velocità di chiusura delle mascelle e sulla forza del morso. Dovremo inoltre sviluppare nuovi protocolli di sicurezza: in acqua i coccodrilli hanno il coltello dalla parte del manico. Ma ci arriveremo. Forse saremo più brizzolati e ammaccati di quando abbiamo iniziato questa ricerca, ma siamo all'altezza del compito. ■

PER APPROFONDIRE

Insights into the Ecology and Evolutionary Success of Crocodilians Revealed through Bite-Force and Tooth-Pressure Experimentation. Erickson G.M. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 7, n. 3, articolo n. e31781, 14 marzo 2012.

The Biomechanics Behind Extreme Osteophagy in *Tyrannosaurus rex*. Gignac P.M. ed Erickson G.M., in «Scientific Reports», Vol. 7, articolo n. 2012, 17 maggio 2017.

Restituire alla vita il *Tyrannosaurus rex*. Erickson G.M., in «Le Scienze» n. 375, pp. 40-49, novembre 1999.

Un divario crescente

La speranza di vita negli Stati Uniti aumenta in modo diseguale

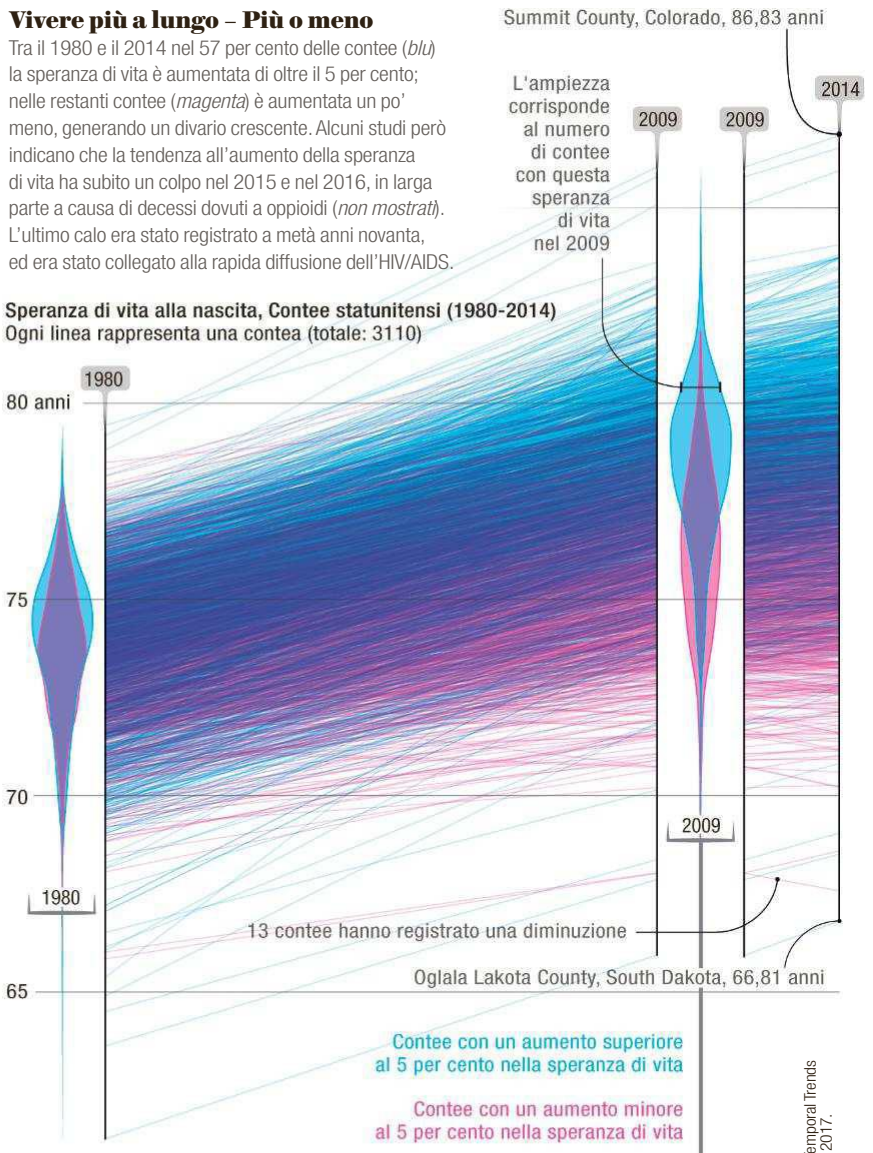
Negli Stati Uniti le persone vivono più a lungo rispetto al passato, tuttavia la speranza di vita dei residenti sulla costa est e su quella ovest e dei residenti in Colorado centrale e Alaska è cresciuta di più rispetto al sud-est del paese e ad altre località. Sebbene la media nazionale sia aumentata da 73,8 a 79,1 anni tra il 1980 e il 2014, il divario tra le contee con i tassi più alti e più bassi è aumentato sorprendentemente fino al valore di 20 anni (*grafico a fianco*). Ugualmente sorprendente è il fatto che questa disparità sia dovuta non tanto al reddito o al gruppo etnico di appartenenza – a lungo ritenuti i fattori principali – ma a comportamenti come l'inattività fisica e a condizioni metaboliche come il diabete (*insieme dei grafici*).

«Ora che siamo stati in grado di identificare i fattori di rischio veramente importanti, possiamo capire come affrontarli», ha affermato Laura Dwyer-Lindgren dell'Università di Washington.

Mark Fischetti

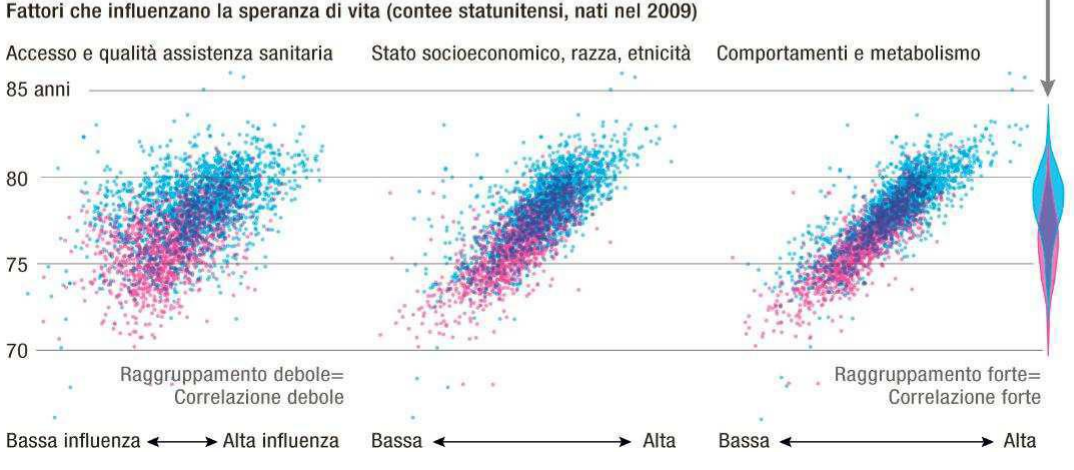
Vivere più a lungo – Più o meno

Tra il 1980 e il 2014 nel 57 per cento delle contee (*blu*) la speranza di vita è aumentata di oltre il 5 per cento; nelle restanti contee (*magenta*) è aumentata un po' meno, generando un divario crescente. Alcuni studi però indicano che la tendenza all'aumento della speranza di vita ha subito un colpo nel 2015 e nel 2016, in larga parte a causa di decessi dovuti a oppioidi (*non mostrati*). L'ultimo calo era stato registrato a metà anni novanta, ed era stato collegato alla rapida diffusione dell'HIV/AIDS.



Il comportamento conta di più

Un insieme di fattori di rischio – comportamenti e metabolismo – influisce sulla speranza di vita molto di più rispetto ad altri fattori importanti: accesso a e qualità dell'assistenza sanitaria, stato socioeconomico e gruppo etnico di appartenenza. In effetti, comportamenti come fumare o non fare attività fisica, e condizioni metaboliche come ipertensione e diabete sono alla base di quasi tutti gli impatti socioeconomici ed etnici.



Grafica Nadieh Bremer; fonte: Inequalities in Life Expectancy Among US Counties, 1980 to 2014: Temporal Trends and Key Drivers, di Laura Dwyer-Lindgren e altri, in «JAMA Internal Medicine», Vol. 177, n. 7, luglio 2017.

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

Inspiegabile? Sì, grazie!

La scienza non vuole evitare il mistero, al contrario invece se ne nutre

«Questo la scienza non lo sa spiegare!» è lo slogan tediosamente frequente che compare in tante discussioni con i sostenitori delle pseudoscienze o delle credenze alternative, lanciato con tono di vittoria a chiudere il dibattito, di solito dopo la descrizione drammatica di qualche fenomeno misterioso. Ma in realtà è uno slogan sbagliato e chi lo usa dimostra di non considerare la profonda differenza fra inspiegabile e inspiegato.

Il primo errore è porre la questione in termini di vittoria e sconfitta, come se si trattasse di un duello personale: ma se un fenomeno resta senza una spiegazione, siamo tutti sconfitti. I misteri sono affascinanti, ma gongolare perché restano irrisolti significa tifare per l'oscurantismo.

Il secondo errore è pensare che la mancanza di una spiegazione scientifica per qualcosa dimostri automaticamente che le visioni alternative o pseudoscientifiche del mondo sono corrette: se tuttavia vedo un illusionista indovinare una carta con una tecnica che non conosco, non vuol dire che stia per forza usando poteri paranormali per leggere il pensiero e che quindi siano validate tutte le teorie sulla telepatia.

Il terzo sbaglio è dimenticarsi che un fenomeno può restare inspiegato per ragioni che non hanno nulla a che fare con i limiti del metodo scientifico: per esempio perché i dati non sono sufficienti, perché il fenomeno non è ripetibile e quindi osservabile attentamente, oppure perché indagarlo richiede un dispendio di risorse insostenibile. Lo slogan non considera la possibilità che in presenza di dati più completi o di una sua ripetizione, il fatto «inspiegabile» sarebbe in realtà perfettamente spiegato.

Prendete per esempio questo enigma classico: un celebre attore deve andare al sedicesimo piano di un grattacielo per visitare un'amica. Prende l'ascensore, ma misteriosamente si ferma al tredicesimo piano e poi fa tre piani a piedi. Quando torna a casa, invece, prende l'ascensore regolarmente dal sedicesimo piano. Perché? Possono venirvi in mente tante spiegazioni, dalla superstizione al bisogno di esercizio fisico al guasto dell'ascensore, ma quella giusta probabilmente vi sfugge perché vi manca un dato fondamentale: l'attore è un nano e non arriva a schiacciare il pulsante del sedicesimo piano. Avendo questo dato, il fenomeno diventa perfettamente spiegabile senza dover ricorrere a ipotesi fantasiose.

Di recente mi è arrivata una testimonianza scioccante: una persona di ottima reputazione mi ha scritto, con tono molto agitato, che mentre viaggiava da sola in auto di notte in una strada di campagna si è imbattuta, dopo una curva, in un oggetto metallico lucido che fluttuava nell'aria qualche metro al di sopra di un campo. L'oggetto brillava nella luce dei fanali dell'auto e si è fatto osservare a lungo senza reagire alla presenza della persona.

È un racconto che farebbe esultare molti ufologi, aggiungendosi agli annali dei misteri irrisolti, e che parrebbe giustificare l'asserzione che esistono cose che la scienza non può spiegare. A dirla tutta, non lo spiegherebbe neppure l'ufologia, perché asserire senza prove che si tratta di un veicolo extraterrestre non è affatto una spiegazione. Ma poi il testimone mi ha mandato un'informazione aggiuntiva: un suo breve, sgranatissimo video del fenomeno, sufficiente però a triangolare posizione e distanza dell'oggetto e identificarlo. Era un palloncino argentato, parzialmente sgonfio, che conteneva ancora abbastanza gas da galleggiare pigramente sopra il campo e riflettere la luce dei fanali. La scienza non vuole uccidere il mistero, ma al contrario se ne nutre; non capire questo concetto è forse l'errore più grave di tanta antiscienza. Ma dev'essere un mistero vero.

Ma quale UFO. In caso di avvistamenti poco chiari di oggetti volanti, dichiarare senza prove che si tratta di un veicolo extraterrestre non è affatto una spiegazione.

timsa/iStock

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Preparare la pelle al Sole

Con la bella stagione arrivano pubblicità di improbabili prodotti abbronzanti

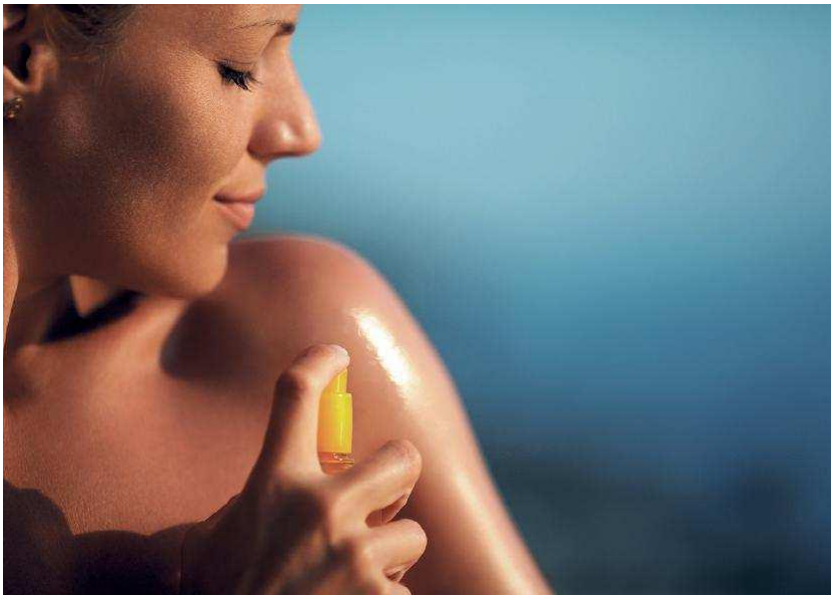
«Da oggi, non potrete più acquistare le pillole French Bronze», recitava un articolo pubblicato sul bollettino della Food and Drug Administration a febbraio 1990. Con la disposizione dei giudici della Corte d'appello statunitense di vietare la vendita di integratori abbronzanti a base di cantaxantina si chiudeva un'epoca e si stringevano ancora un po' le maglie del regolamento su cosmetici e integratori alimentari, perlomeno negli Stati Uniti.

La titolare di French Bronze, Diane Alberti, raccoglieva le prenotazioni per telefono e ordinava una media di 1500 confezioni al mese a una ditta specializzata nella produzione di coloranti alimentari. Per la pubblicità contava sul passaparola e sul posizionamento su riviste locali di *fitness*. Le *brochure* di questi integratori ne declamavano le proprietà: prevenire le scottature, le desquamazioni e anche i tumori alla pelle. Peccato che non ci fosse niente di vero.

La cantaxantina è una molecola della famiglia dei carotenoidi che veniva spesso usata come «acceleratore» di abbronzatura perché ha la caratteristica di depositarsi in varie parti dell'organismo, pelle compresa, donandole una colorazione che va dal giallo al *beige* al marrone a seconda delle dosi assunte. La colorazione non ha alcun effetto protettivo nei confronti dei raggi ultravioletti e, anzi, si porta dietro effetti collaterali non trascurabili come la «retinopatia da cantaxantina» caratterizzata dal deposito di cristalli gialli di questa molecola sulla retina. Per questi e altri motivi, il suo uso come ingrediente cosmetico non è stato autorizzato, ma può essere usata, in dosi molto basse, come additivo alimentare o nei mangimi per il pollame per intensificare il colore arancione dei tuorli. È bastato questo a Diane Alberti e ai tanti produttori come lei per aggirare i regolamenti e vendere «coloranti alimentari» spacciandoli per cosmetici.

È raro trovare oggi prodotti contenenti questo ingrediente, ma la storia del French Bronze è tornata attuale più che mai. Non ci sono più numeri di telefono da chiamare e le pubblicità corrono su altri canali, ma le dinamiche sono purtroppo sempre le stesse. Con l'arrivo della bella stagione, sui *social media* e in particolare su Instagram, la piattaforma dedicata alla condivisione delle fotografie, sono sbocciate le pubblicità di improbabili beveroni per dimagrire o veder scomparire la cellulite e ovviamente le pillole. Ci sono pillole per tutto, da quelle che aiutano a detossificare l'organismo, a quelle per far crescere più velocemente i capelli a quelle per «preparare la pelle al Sole». Se sui media tradizionali l'Autorità garante per la concorrenza del mercato vigila e sanziona le aziende che le sparano un po' grosse, Instagram è ancora il Far West. Basando il suo traffico su contenuti visivi e temporanei è moto difficile da controllare. Chi lo frequenta assiste all'invasione di personaggi che vivono di commissioni pubblicitarie, sfruttano la propria bellezza per promuovere questi prodotti e le sparano grosse per riuscire a raggiungere un pubblico sempre più ampio.

Nel campo della preparazione della pelle al Sole, gli integratori che vanno per la maggiore in questo periodo si dividono in due grandi categorie: quelli a base di tirosina, l'amminoacido di partenza per la sintesi metabolica della melanina, e quelli a base di beta carotene, un parente stretto della cantaxantina, che ingialliscono la pelle e quindi la fanno «sembrare» più abbronzata e dunque protetta.



Effetti dubbi. Secondo l'EFSA la maggior parte degli effetti decantati da integratori per l'abbronzatura non è supportata da dati scientifici certi.

Secondo l'EFSA, l'autorità europea per la sicurezza alimentare, la maggior parte degli effetti decantati da questi prodotti non è supportata da dati scientifici certi, tanto che le richieste di aggiungere la dicitura «aiuta a preparare la pelle e ad attivare l'abbronzatura» sui prodotti contenenti questi ingredienti è stata respinta. Ma come insegna la storia del French Bronze, le vie per aggirare i regolamenti sono infinite.

glaxia/iStock

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Una pillola pericolosa contro la ciccia

Un dimagrante messo al bando è tornato illegalmente in commercio on line

Rimpinzarci di tutto quello che ci piace, poi prendere una pillola che, magicamente, ci fa dimagrire. È il sogno di ogni goloso, e non è un caso se con l'avvicinarsi dei mesi estivi e della fatidica «prova costume», si moltiplicano le pubblicità di prodotti che assicurano dimagrimenti miracolosi in brevissimo tempo. Questi prodotti promettono di «bruciare i grassi» in pochi giorni ma non possono mantenere la promessa perché violerebbero il principio di conservazione dell'energia. Considerate che consumando 1 chilogrammo di grasso si libera energia sufficiente per innalzare di 30 °C circa 300 litri d'acqua. Se pensate che siamo fatti in buona parte d'acqua, capite come questa energia non può essere liberata troppo velocemente, pena la morte.

Uno dei primi prodotti dimagranti fu il dinitrofenolo o DNP, usato durante la prima guerra mondiale come esplosivo. Ci furono varie intossicazioni tra i lavoratori nelle fabbriche che lo producevano: nei casi lievi gli operai mostravano segni di affaticamento, sudorazione e perdita di peso. Le intossicazioni fulminanti invece procedevano con una febbre altissima, anche di 43 °C, che portava rapidamente alla morte. Il corpo, particolare raccapricciante, anche dopo il decesso continuava ad aumentare la propria temperatura, come se ci fosse internamente un combustibile che liberava energia. Tra maggio 1916 e maggio 1918 morirono almeno 36 persone.

Il DNP agisce aumentando il metabolismo cellulare, bruciando letteralmente grassi e carboidrati ma disattivando il meccanismo che le cellule usano per immagazzinare in ATP l'energia liberata, che quindi è dissipata come calore. Tecnicamente è un «disaccoppiante della fosforilazione ossidativa».

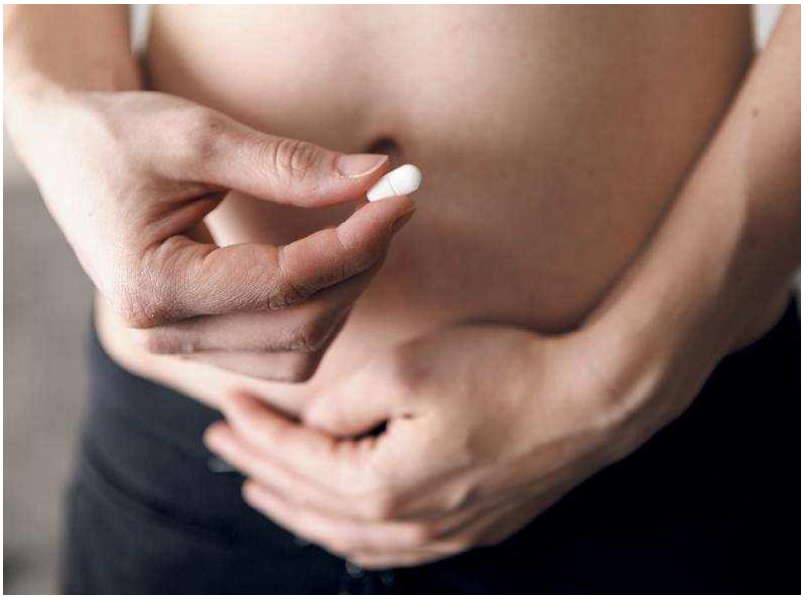
Nel 1931 Maurice Tainter, un farmacologo della Stanford University, avendo notato l'azione dimagrante del DNP, iniziò a sperimentarlo su pazienti obesi. Trattò nove soggetti per periodi da una a 10 settimane. Il loro metabolismo aumentò in media del 40 per cento e tutti persero peso – circa 900 grammi alla settimana – senza alcun tipo di restrizione alimentare: un sogno diventato realtà per chiunque voglia dimagrire.

A un convegno del 1934, Tainter dichiarò che la clinica di Stanford nell'ultimo anno aveva distribuito più di 1.200.000 capsule di dinitrofenolo, stimando che in tutti gli Stati Uniti almeno 100.000 persone fossero state trattate con il DNP. Tra il 1933 e il 1934 però ci furono i primi decessi, come una giovane donna che aveva acquistato autonomamente pillole dimagranti e che morì per la febbre altissima. Durante il convegno Tainter commentò cinicamente «considerando che con questo farmaco così potente sono stati trattati circa 100.000 pazienti, è gratificante sapere che le morti non sono state più numerose».

Le pillole dimagranti di DNP, come la Formula 281, erano vendute senza prescrizione medica. La pubblicità recitava «finalmente un aiuto per dimagrire che vi darà una figura che gli uomini ameranno e di cui le donne saranno gelose. Nessun pericolo per la tua salute! Nessun bisogno di cambiare stile di vita!»

L'illusione di un dimagrimento rapido senza rischi crollò nel 1935 quando un oculista descrisse quattro casi di persone che, dopo il trattamento con il DNP, avevano sviluppato una cataratta così grave da perdere la vista. Elemento ancora più allarmante, la cecità era sopraggiunta molti mesi dopo il termine del trattamento dimagrante. Si stima che almeno 2500 persone negli Stati Uniti abbiano perso la vista a causa delle pillole dimagranti. Nel 1938 la vendita del dinitrofenolo fu vietata ma è riemerso di recente venduto illegalmente on line come dimagrante per chi fa *bodybuilding*. E dal 2002 al 2012 ha causato altri 12 morti portando il totale accertato a oltre 60.

I dimagrimenti ottenibili con queste pillole sono analoghi a quelli che si possono ottenere con una normale dieta. Vale la pena di rischiare?



Promesse impossibili. I prodotti che fanno sperare di bruciare grassi in pochi giorni non possono mantenere la promessa perché violerebbero la termodinamica.

Jarin13/iStock

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

La gatta di Schrödinger

La prima scatola a comparire sulla scena è quella che Piotr fa quasi cadere per terra mentre armeggia con chiavi e serratura nel tentativo di espletare la complicata operazione di entrare in casa. Non che sia una scatola particolarmente voluminosa: giusto una capacità sui 15 litri, insomma approssimabile a un cubo di 25 centimetri di lato, ma più che sufficiente a inibire la coordinazione del nostro, che a stento riesce infine a varcare la soglia, chiudere l'uscio dietro di sé e a fare in modo che la scatola non voli per terra. Alice, dalla cucina, osserva la scena, alza gli occhi in segno di muta rassegnazione e laica preghiera, e non interrompe quello che sta facendo.

Curiosamente, una scatola del tutto simile è appoggiata proprio sul tavolo dove Alice è alacremente impegnata nel preparare quella che ha tutto l'aspetto esteriore di una torta, ma con un profumo e un colore non propriamente abituale nei dolci che si è soliti ammirare nelle pasticcerie.

Il sorriso orgoglioso e soddisfatto di Piotr si spegne lentamente, prima ancora che una parola si scambi fra i due, quando nota che la scatola appoggiata sul tavolo della cucina non è solo simile, ma del tutto identica a quella che lui sta già ostentando con malcelato orgoglio.

«Ma... non vorrai dirmi che anche tu... allora ti sei ricordata... però non credevo che avresti pensato a preparare... ma conosci anche tu quel negozio di *Delikatessen*?»

Alice evita di alzare ancora una volta gli occhi al cielo e continua imperterrita a decorare la sua strana torta.

«Ma Doc – dice infine con solo un velo di impazienza – se qualche volta parlassi prima, invece di affannarti a cercare di stupire? Comunque, per rispondere a tutte le tue mezze domande: passo davanti a quel negozio di leccornie per animali almeno due volte al giorno, quindi sì, lo conosco. Con buona pace di voi maschietti che vi vantate d'essere provetti maestri dell'alta cucina, in questa casa l'unica che è in grado di distinguere un mestolo da un frullatore è la sottoscritta, quindi non vedo perché stupirsi se mi vedi qui a preparare qualcosa da mangiare. Infine, visto che da sempre la sola, unica e reale responsabile della micia sono io, pensi davvero che potessi dimenticarmi del decimo compleanno di Gaetanagnesi?»

«Così ha comprato anche tu quel kit per preparare la *Katzesachertorte* a base di ostriche, salmone e decorazioni con crocchette... vorrà dire che la micia ne avrà due, per un compleanno così importante.»

«Tu sei matto, già con una la micia rischia un'indigestione. E comunque...»

Dalla porta arriva un fragore in grado di interrompere qualunque conversazione. In realtà è una somma di rumori distinti: fascio di giornali che precipita sul portariviste, porta che sbatte, sfarfallio di cappello che volta sull'appendiabiti, tintinnio di pipa, curapipe, accendino e scatola di tabacco lasciati cadere sul tavolinetto di cristallo, e naturalmente una tonante voce baritonale di saluto: «Sveglia, gentaglia! Sgombrate la cucina, che ho compra-

Illustrazione di Stefano Fabbri

to qualcosa che le vostre piccole menti umane non possono neppure immaginare...»

«Come no... un'altra torta per gatti dai Bastioni di Orione, vero?», sospira Alice.

La terza scatola identica alle due precedenti lascia le mani di Rudy e atterra a fianco delle altre sul tavolo della cucina.

«Molto bene – osserva quietamente Alice – non si può dire che ci sia penuria di cibo e di scatole per gatti, in questa casa, oggi.»

«Scatole e gatti... – mormora Doc – un *topos* della scienza del Novecento...»

«Già!» Gli occhi di Rudy brillano in risposta: «Il Principio di Sovrapposizione quantistico genialmente illustrato dal micio di Schrödinger chiuso nella scatola con la sostanza radioattiva, il contatore Geiger e la fiala di cianuro! E la sovrapposizione degli stati quantistici che si amplifica nella fisica macroscopica con la sovrapposizione degli stati "gatto vivo" e "gatto morto" e... ahia!»

«Ahia!»

I due "ahia!" emessi in rapida successione da Rudy e Piotr sono in stretta corrispondenza biunivoca con due precisi colpi di mestolo emessi da Alice sulla fronte dei due maschietti.

«Se provate a dire un'altra volta, anche solo per scherzo, la pa-

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di giugno e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Il decimo compleanno di Gaetanagnesi è l'occasione per cucinare una torta e per giocare con matematica e cibo

IL PROBLEMA DI APRILE

Il mese scorso si parlava di uno giardino diviso in «celle quadrate» che evolveva giorno per giorno nelle celle adiacenti: insomma equivalente a un foglio a quadretti in cui, dopo aver posto un 1 in un quadretto, il giorno dopo si ritrova il quadretto originario vuoto, e i 4 adiacenti riempiti con un 1. Si vede che ogni generico numero k contribuisce alle celle vicine con un valore k, per un totale di $4k$ di incremento generale. Quindi a ogni giorno il numero dei fiori è moltiplicato per 4, e l'n–esimo giorno se ne avranno 4^n. Si può inoltre calcolare che la casella centrale sarà pari a zero quando n è dispari, mentre per n pari conterrà il quadrato del binomiale tra n e $n/2$. Considerando che i numeri si propagano sulla griglia secondo uno schema a rombo, è facile vedere che i numeri su un bordo all'n–esimo passaggio sono quelli dell'n–esima riga del triangolo di Tartaglia. Non solo, ma (ruotando il rombo, in modo da ottenere un quadrato) i numeri nella k–esima riga e nella m–esima colonna sono dati da n binomiale k moltiplicato n binomiale m, (il che giustifica il valore dato al punto precedente per il quadrato centrale).

rola "cianuro" vicino al nome "Gaetanagnesi" vi garantisco che finirete presto a parlare di persona con lo spirito di quel sadico di Schrödinger!»

«Treccia, vacci piano con quel coso!», piagnucola Piotr, strofinandosi la fronte. «Quello di Schrödinger era solo uno stramaledetto *Gedankenexperiment*, un esperimento ideale che nessuno si sogna di rendere reale, tanto meno con la nostra micia! E poi, a dire la verità, le tre scatole associate ad animali a me hanno fatto pensare al Gioco di Monty Hall, non ai gatti mezzi vivi e mezzi morti.»

«Oh beh – dice Rudy, anche lui massaggiandosi la testa – però in Monty Hall dentro le due scatole perdenti ci sono capre, mica felini.»

«Non fare il pedante, GC! Capre o tigri (che felini sono), sempre indici di scommessa persa restano, in giochi come questo; e macchine sportive o donne leggiadre (prive di mestolo) sono tradizionalmente premi per le risposte esatte.»

«Il che mostra che anche la matematica ricreativa ha i suoi scheletri nell'armadio, per quanto riguarda il rispetto della parità di genere... donne mercificate a premi, bleah! Quasi quasi vi tiro un altro paio di mestolate...»

«Dai, Treccia, non è mica colpa nostra», si affretta a dire Doc, allontanandosi cautelativamente dal raggio d'azione del mestolo; «comunque la gatta conosce il Gioco di Monty Hall molto meglio di noi, ormai. Figurati se mi passa per la testa di proporglielo.»

«E però... – comincia Rudy, pensieroso, mentre il gelo cala improvviso nella piccola cucina – ...però oltre a tre scatole abbiamo tre torte, e mi stavo giusto chiedendo... ecco sì. Ascoltatemi bene: Monty Hall nella sua forma classica è ormai più che analizzato. Metto una torta in una di tre scatole chiuse, ne faccio scegliere una alla micia, poi ne apro una vuota delle due non scelte, e chiedo alla pantera in sedicesimo se vuole cambiare scatola. Gaetanagnesi conosce il calcolo delle probabilità molto meglio di voi, e sa benissimo che le conviene cambiare, giusto?»

In risposta arrivano due «giusto» da voci umane e un «miao» affermativo dal soggiorno, a dimostrazione dell'acuità uditiva dei gatti.

«Ma se proponiamo alla gatta una serie di giochi di Monty Hall? Al primo tentativo, vince una torta se indovina la scatola. Però se non la indovina, avrà il diritto di un secondo gioco, e nella scatola vincente ci saranno non una, ma due torte. Qual è la strategia migliore da seguire, volendo massimizzare la vincita? Ovviamente, dovrà definire le azioni possibili (tenere la scatola scelta inizialmente o cambiarla) in entrambi i giochi...»

Doc ha l'aria concentrata, Alice a mezza via tra lo stupito e il furioso: «DUE torte?», si limita a ringhiare.

«E naturalmente c'è il passo ulteriore, visto che di torte ne abbiamo tre: se fallisce i primi due, nel terzo gioco la scatola vincente conterrà tre torte. Come dovrebbe comportarsi la micia, che è notoriamente una giocatrice perfetta, quando si tratta di matematica e di cibo?»

Doc ha l'aria sempre più concentrata, con un velo di frustrazione. Alice ha annullato la sua quota di stupore e raddoppiato quella di furia: «TRE Torte? Sei impazzito? Vuoi forse assicurarti che non arrivi agli 11 anni?»

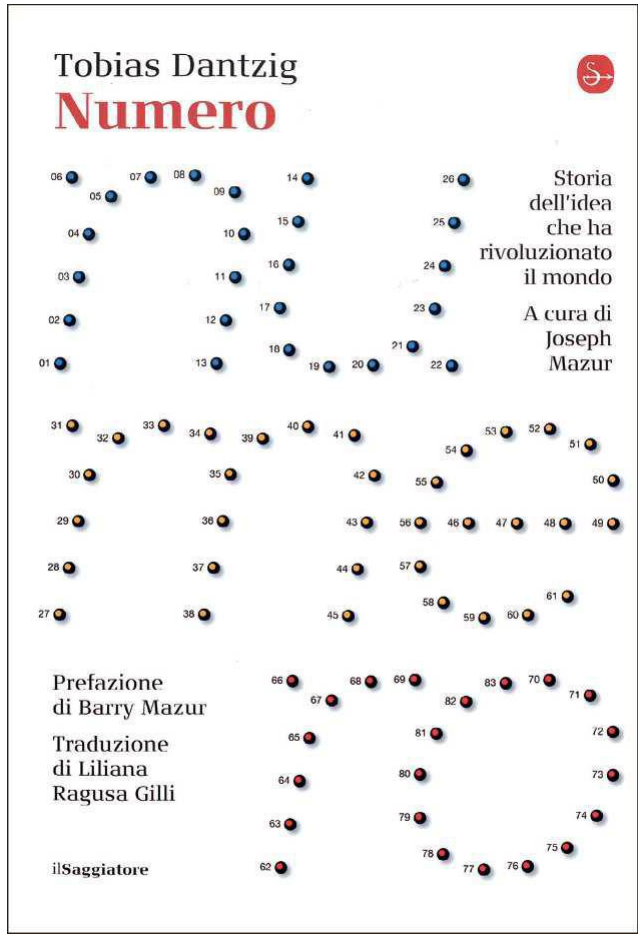
Poi cade un silenzio preoccupante, mentre il mestolo di Alice comincia a roteare pericolosamente.

«Treccia... no, su, Treccia... ricordi? Anche questo è solo un *Gedankenexperiment*, non penserai che...»

Mentre nel soggiorno si rappresenta un inseguimento degno delle comiche anni trenta, sul divano una gatta nera sta già leccandosi i baffi.

Matematica con passione

Numero
di Tobias Dantzig
il Saggiatore, Milano, 2018, pp. 348 (euro 27,00)



Il cognome Dantzig può risvegliare memorie tra gli informatici: appartiene infatti a George, padre della programmazione lineare; nel 1947, quando matematica e *computer science* erano ancora quasi due coniugazioni di una sola disciplina, George Dantzig dimostrò al mondo il potere degli algoritmi, anche dal punto di vista delle loro applicazioni industriali.

L'autore di questo libro è però Tobias, il padre di George. Classe 1884, Tobias lascia la natia Lettonia prima per Parigi, dove studia con Henri Poincaré; poi abbandona definitivamente l'Europa poco prima dello scoppio della Grande Guerra, diretto verso gli Stati Uniti. Qui, da sconosciuto migrante, si adatta a fare mestieri come il taglialegna e l'imbianchino: quando infine la sua natura di matematico viene riconosciuta, comincia a insegnare in varie università e trova il tempo per pubblicare, nel 1930, un libro destinato a diventare un classico: questo *Numero,* che è ora disponibile anche in italiano in una edizione curata e arricchita dal matematico Joseph Mazur.

Come esplicita anche il sottotitolo originale (*A critical survey written for the cultured non-mathematician*), si tratta di un libro pensato per lettori curiosi, ma non matematici, che ha l'obiettivo di mostrare sia l'evoluzione sia le idee guida fondamentali della matematica. E come spesso accade, i libri pensati per i non specialisti riescono a illuminare il soggetto con una luce che può risultare nuova anche per i professionisti: il libro di Dantzig fu encomiato persino da Albert Einstein, e quel lusinghiero commento occupa interamente la quarta di copertina di questa edizione.

Non c'è da stupirsi che il padre della relatività, che era filosofo almeno tanto quanto era fisico, sia rimasto affascinato dal racconto di Dantzig: e forse può bastare elencare gli autori delle citazioni poste all'inizio dei capitoli per mostrare la natura e la caratura culturale dell'opera. Rispetto a quella prima edizione che avrà letto Einstein, questa nuova è arricchita da quattro corpose appendici, da diverse prefazioni e da un paio di postfazioni (oltre alle note e agli indici), che ben dimostrano l'importanza anche storica del testo; e delle quasi 350 pagine che costituiscono il volume, il libro originale ne occupa appena 200, organizzate in 12 capitoli. Le citazioni di apertura sono di Ovidio, Laplace, Nicomaco, Zenone, Hertz, Kronecker, Hilbert, Nietzsche, Khayyām, Jacobi, Cantor ed Eddington: quasi a voler ribadire come la matematica non sia altro che parte integrante, cruciale della più generale cultura dell'umanità.

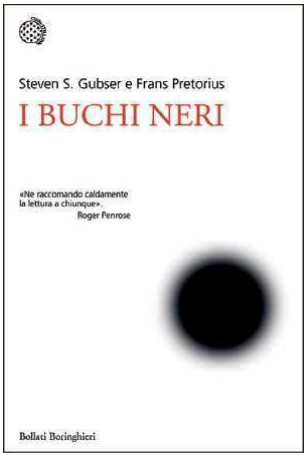
Il linguaggio e lo stile, che tutto sembrano meno che vecchi di quasi un secolo, veicolano un elemento oggi assai raro nelle opere scientifiche: la passione. Nel nono capitolo, quando affronta il difficile tema del «continuo» con cui siamo propensi a leggere il mondo fisico, contrapposto al «discreto» che sembra governare l'aritmetica, Dantzig richiama un'immagine musicale, e pertanto essenzialmente emotiva: «L'armonia dell'universo non conosce che una forma musicale, il legato, mentre la sinfonia del numero non conosce che il suo opposto, lo staccato.»

I due termini musicali, «staccato» e «legato» sono ovviamente in italiano anche nell'originale inglese, e non si può fare a meno, nell'incontrarli durante la lettura, di rivolgere un grato pensiero anche a chi si è fatto carico della traduzione; anche perché si tratta di un altro importante pezzo di storia della matematica, questa volta italiana. La traduttrice è Liliana Ragusa Gilli: matematica, educatrice, ricercatrice del Consiglio nazionale delle ricerche, è stata tra le grandi innovatrici della didattica matematica insieme a Emma Castelnuovo, della quale era collega e grande amica.

Non è un libro di «storia della matematica», anche se vi si trova abbondanza di notizie e ritratti dei grandi matematici del passato; non è neppure un libro di «filosofia della matematica», anche se la lettura suscita domande profonde sulla natura dei numeri, e in qualche modo addirittura sulla loro ontologia. È piuttosto un libro che, da ottant'anni, cerca di mostrare come la matematica sia intrigante, intelligente e misteriosa: e come possa, almeno in una certa misura, essere vista come un altro tentativo dell'uomo di raggiungere l'assoluto.

Piero Fabbri

I protagonisti della nuova stagione dell'astrofisica



I buchi neri
di Steven S. Gubser e Frans Pretorius
Bollati Boringhieri, Torino, 2018, pp. 176 (euro 20,00)

Il 14 settembre di tre anni fa ha le carte in regola per diventare una data storica, come il 29 maggio del 1919, quando l'osservazione di un'eclissi di Sole fornì le prove della correttezza della teoria generale della relatività di Albert Einstein. Anche per il 14 settembre 2015 Einstein infatti gioca un ruolo determinante, perché quel giorno i due interferometri statunitensi della collaborazione LIGO hanno rilevato per la prima volta le onde gravitazionali generate dallo scontro di due buchi neri, proprio come previsti dal padre della relatività. La conferma dell'evento da parte anche di Virgo, il «concorrente» europeo di LIGO costruito a Cascina, vicino a Pisa, ha aperto le porte a una nuova stagione dell'astrofisica che ha per protagonisti proprio i buchi neri.

Per orientarsi tra queste nuove scoperte serviva una bussola e provano a fornirla due fisici, entrambi della Princeton University. La loro è anche una storia dell'astrofisica che inizia con la spinta teorica data dai lavori di Einstein, si complica con le soluzioni alle equazioni di Einstein fornite da Karl Schwarzschild che descrivono un singolo buco nero statico e poi con gli studi di Roy Kerr, che descrivono il comportamento di un buco nero rotante. Ma siamo ancora lontani dalla complessità, e dal fascino, dell'evento registrato da LIGO e Virgo. Per arrivarci servono ancora alcuni decenni, punteggiati dai contributi di John Wheeler, il recente Nobel Kip Thorne, Roger Penrose e il da poco scomparso Stephen Hawking. Tutti trovano lo spazio che meritano nel libro che ha il limite di presupporre che il lettore sia già in grado di masticare una certa dose di astrofisica, ma due pregi della buona divulgazione: linearità e sintesi.

Marco Boscolo

Una vita al pronto soccorso, tra Addis Abeba e Toronto

Salvare una vita
di James Maskalyk
Einaudi, Torino, 2018, pp. 224 (euro 14,00)

A di *airway,* le vie aeree; B di *breathing*, la respirazione; C di *circulation*, la circolazione. Sono i primi tre aspetti da valutare in chi è appeso alla vita con un filo. E sono i primi tre capitoli del libro di James Maskalyk, medico d'emergenza che, dopo un fortunato volume sulle sue esperienze in Sudan con Medici senza Frontiere, racconta ora la sua vita divisa fra un pronto soccorso di Toronto e uno di Addis Abeba. Sono due realtà ben diverse, ma con molte più somiglianze di quanto si crederebbe. A partire dall'atmosfera carica di caos e frenesia, di scelte fulminee e riflessioni tormentose, di emozioni contrastanti, fra la soddisfazione di salvare una vita e la sensazione estraniante di medici che toccano mille corpi e non sono toccati da nessuno. Analoghi sono altresì i tipi umani attirati a ogni latitudine da questi ambienti di lavoro, in cerca di adrenalina, anche a costo di sacrifici e delusioni personali.

I racconti si susseguono al ritmo dell'alfabeto, con un capitolo (più o meno) per ogni lettera: D per *drugs*, farmaci, ma anche J per *jubilee*, festeggiamenti. Le narrazioni vivide rendono bene l'atmosfera, le sensazioni, i pensieri, persino nelle descrizioni anatomiche: «Ogni volta che si inspira, tramite le vie aeree si porta aria nuova verso il sangue che scorre caldo e rapido oltre i cento metri quadrati di una membrana spessa due cellule ripiegata nel torace a formare delicati palloncini rosa». E le numerose riflessioni danno la misura della passione che anima chi ci lavora: nella sua ferrea logica egualitaria per cui chi più ha bisogno è trattato prima, «di tutti i posti che conosco, il pronto soccorso è quello con la logica migliore. È per questo che lavoro qui. È una cosa che dà speranza».

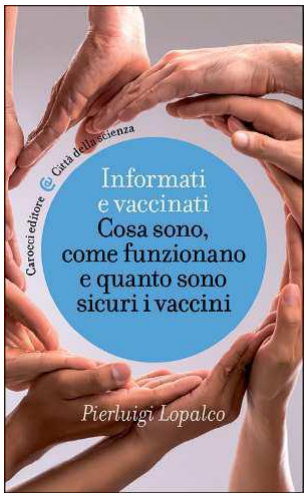
Giovanni Sabato

Il tempo della cura in un mondo più anziano

Oggi nei paesi ricchi le persone vivono più a lungo rispetto al passato. In molte di queste nazioni l'aspettativa di vita supera ormai gli ottant'anni di età, grazie ai progressi della scienza medica. Alla medicina però si chiede anche di migliorare la qualità di questa vita più lunga, con particolare attenzione alle malattie che possono insorgere tipicamente in una popolazione anziana.

A questo tema, declinato come «il tempo della cura», è dedicata la quarta edizione del Festival della Scienza Medica, che si tiene a Bologna dal 3 al 6 maggio (ma attenzione ad appendici per i giorni successivi, ancora in preparazione al momento in cui scriviamo). Questa edizione conta oltre 70 relatori e più di 70 eventi, tutti gratuiti, distribuiti in varie sedi della città e raggruppati in cinque filoni tematici: neuroscienze, medicina interna, innovazione e tecnologia, oncologia e alimentazione. C'è spazio anche per temi economici e legali, vale a dire dibattiti sui costi delle terapie e sulla responsabilità dei medici, e anche per questioni di attualità come le cure palliative e il fine vita. Per tutte le informazioni e il programma completo si può visitare il sito web: https://bologna-medicina.it. (*cb*)

Cortesia Festival della Scienza Medica



Informati e vaccinati
di Pier Luigi Lopalco
Carocci editore, Roma, 2018, pp. 110 (euro 13,00)

Perché dobbiamo essere riconoscenti ai vaccini

Nell'ultima edizione di un ottimo manuale sulle malattie infettive pensato per l'università, racconta l'epidemiologo Pier Luigi Lopalco dell'Università di Pisa, la poliomielite non è neppure nominata. Una scelta senz'altro discutibile, perché il virus della malattia circola ancora in alcune parti del mondo, ma significativa. In qualche decennio, una malattia che costituiva una parte imprescindibile dell'istruzione dei futuri medici sembra essere passata in secondo piano. Di mezzo c'è stato un vaccino – anzi due, il Salk e il Sabin – che ha permesso di far scomparire un pericoloso virus da gran parte del pianeta e che speriamo ci porti presto alla sua eliminazione.

Eppure proprio l'efficacia delle vaccinazioni è una delle cause della loro messa in discussione, perché ci hanno fatto dimenticare le terribili malattie da cui ci proteggono. Ecco perché la letteratura divulgativa sente sempre più spesso l'esigenza di ricordarci come mai dovremmo essere grati ai vaccini, nonostante l'antivaccinismo conquisti sempre più spazio nei mezzi di comunicazione.

La scelta dell'autore è procedere sottolineando soprattutto quello che la scienza ci può dire dei vaccini, più che le farneticazioni della pseudoscienza. Lo spazio dedicato alla confutazione delle teorie complottiste non sovrasta la parte «in positivo», per evitare l'effetto boomerang di un involontario rinforzo delle bufale, un rischio messo più volte in evidenza da chi studia i meccanismi della comunicazione della scienza. Apprezzabile anche la sezione dedicata a chiarire gli errori di percezione in cui è facile cadere quando si valutano sicurezza ed efficacia di un vaccino. Si tratta di distorsioni dovute all'impossibilità, per il singolo, di avere una prospettiva globale, delle quali potrebbero essere vittima anche i medici, se non particolarmente ferrati in epidemiologia. Questi aspetti dovrebbero essere una parte fondamentale della formazione del personale sanitario, a cui i genitori si rivolgono per chiarire i dubbi.

Molto opportuno anche l'onesto riferimento agli insuccessi vaccinali: un argomento su cui spesso si preferisce glissare, perché si teme che parlarne possa aumentare la diffidenza verso i vaccini. A fomentare il complottismo è, semmai, proprio il fatto di non parlarne, come dimostrano milioni di conversazioni sui *social*, centrate proprio sulle «tante verità che Big Pharma ci nasconde».

Completa il quadro positivo lo stile piano e il tono pacato: al lettore è subito chiaro che lo scopo non è prendersi gioco delle sue domande, ma aiutarlo a capire. E accompagnarlo gradualmente a comprendere l'importanza di una delle più grandi conquiste della medicina.

Anna Rita Longo

Vita 3.0
di Max Tegmark
Raffaello Cortina, Milano, 2018, pp. 452 (euro 29,00)

Mostro tecnologico o alleato? L'IA e il nostro futuro

Quanto manca per arrivare a un'intelligenza artificiale davvero in grado di rendersi autonoma? Nessuno è in grado di fare una previsione esatta, ma il traguardo appare comunque fattibile, anche se non proprio dietro l'angolo. Dunque, è giusto iniziare a pensare a quel futuro in cui la vita non sarà più solo basata sul carbonio, come gli organismi attuali, ma sul silicio, o su qualsiasi materiale che possa essere manipolato allo stesso modo per poter svolgere i semplici passi elementari che permettono la rapida computazione da parte delle macchine.

Entreremo quindi nell'era della vita 3.0, in cui l'intelligenza potrà sopravvivere e replicarsi (la vita 1.0), essere in grado di modificare il proprio *software* attraverso l'apprendimento (versione 2.0) e da ultimo modificare il proprio *hardware*, senza aspettare i tempi lunghi dell'evoluzione. Che cosa succederà? Un mostro tecnologico prenderà il controllo della Terra (e poi degli altri pianeti vicini), o invece sarà un collaboratore devoto e ci aiuterà a sconfiggere tutti i mali del mondo, senza mai prevaricare gli esseri umani? Sono questi i due scenari estremi, ma di mezzo c'è un'enorme gamma di possibilità, dai robot come li conosciamo ai cyborg più sofisticati in cui si «carica» direttamente una mente umana.

Questo denso e stimolante volume esplora i problemi da risolvere nella ricerca di un algoritmo in grado di diventare davvero una vita 3.0. Di fatto propone una breve storia e i più recenti progressi dell'intelligenza artificiale. Tegmark, professore di fisica al Massachusetts Institute of Technology e presidente del Future of Life Institute, considera anche altri aspetti. Come esseri umani, dobbiamo fare scelte filosofiche importanti, a partire dalla definizione di intelligenza (per Tegmark: «Abilità nel realizzare fini complessi»). Dovremo quindi decidere quali scopi assegnare all'algoritmo, per esempio, usarlo per migliorare le armi da guerra o gli investimenti di borsa, per redistribuire la ricchezza o per incrementare le rese agricole.

Affinché la vita 3.0 diventi davvero un'alleata e non una specie di mostro di Frankenstein (il cui fantasma aleggia, anche se citato solo a due pagine dalla fine) serviranno un approccio etico condiviso, trasparenza dei processi di governo dell'innovazione, e la possibilità per i cittadini di esercitare i propri diritti. Sarà anche necessario evitare pregiudizi, in positivo e in negativo. Ben vengano dunque testi come questo, capaci di parlare al pubblico e di introdurre i lettori a un dibattito interessante e necessario.

Mauro Capocci

Equilibrismi in chiave alimentare

La seconda edizione del Food&Science Festival di Mantova ha come tema l'equilibrio tra cibo, scienza e creatività

Mantova, già parte della Regione Europea dell'Enogastronomia 2017 (assieme a Bergamo, Brescia e Cremona), conferma la sua vocazione agroalimentare ospitando la seconda edizione del festival dedicato all'incontro tra cibo e scienza. Dopo il successo dello scorso anno, il Broletto, il Teatro Scientifico Bibiena, Piazza Mantegna e tanti altri spazi della città lombarda fanno da elegante cornice a incontri, conferenze, mostre, laboratori e spettacoli teatrali.

Il tema scelto è «equilibrio», che rimanda immediatamente alla sostenibilità, esplorata dagli organizzatori con l'intervento di Piero Martin e Alessandra Viola, freschi autori di un libro sui rifiuti che pone domande centrali anche per l'agroalimentare: quanto cibo sprechiamo? Quanto vale quello che buttiamo? Come si sta provando a limitare gli scarti nell'industria? Protagonista è la ricerca *made in Italy*, come nel caso di Pierdomenico Perata, il padre di SunBlack, il pomodoro nero ricco di antociani e una delle novità più promettenti che sono usciti negli ultimi anni dai laboratori nostrani. Sempre dall'Italia viene anche Sonia Massari, che fa un lavoro particolare: è una «*designer* del gusto e dei processi industriali» e si confronterà con il pubblico sul tema del *food design* di prodotti innovativi. Tutta nostrana è anche la polemica che riguarda la recente introduzione del pagamento per i sacchetti di bioplastica usati nei supermercati per frutta e verdura sfusi. Per approfondire quali siano le opacità delle norma e le caratteristiche dei diversi materiali usati intervengono Michele Fino, esperto di diritto europeo, e il biotecnologo Stefano Bertacchi.

In arrivo dall'estero sono da segnalare Patrick McGovern, direttore del laboratorio di archeologia biomolecolare per la cucina, le bevande fermentate e la salute dell'Università di Philadelphia, e la *performance* della Vegetable Orchestra, *ensemble* musicale fondato in Austria dieci anni fa che suona esclusivamente strumenti ricavati da frutta e verdura, come le «zucche percussioni» o i *cucumberphones*. Il programma comprende anche due mostre (una dedicata alla storia del riso e una pensata per la corretta alimentazione), uno spettacolo-*reading* sulla storia della cucina italiana con Neri Marcorè e Alessandro Marzo Magno, laboratori per adulti e bambini e un'abbuffata di presentazioni di libri a sfondo enogastronomico.

Marco Boscolo

Dove & quando:

Food&Science Festival
dal 18 al 20 maggio,
Mantova
www.mantovafoodscience.it.

L'anno scorso.
Eventi della passata edizione del festival su cibo e scienza tenutosi a Mantova.

Cortesia: Nanni Fontana (*in alto a sinistra*); Heidrun Henke (*in basso a sinistra*); Food&Science Festival (*a destra, in alto e in basso*)

Lampi nella notte

di Duncan Lorimer e Maura McLaughlin

Strani lampi di «luce» radio proveniente dal cosmo remoto sconcertano gli scienziati da anni. Battezzati «lampi radio veloci», sono in corso numerosi tentativi per scoprire che cosa li provoca. Fra le possibili spiegazioni ci sono stelle compatte, esplosioni di supernova e persino ipotesi esotiche come le stringhe cosmiche.

Ripensare i segnali nervosi

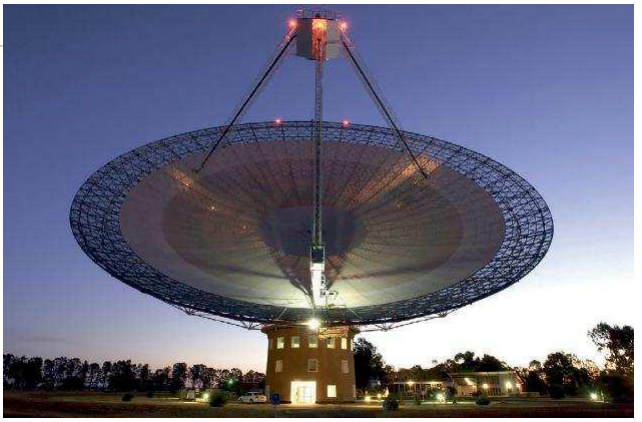
di Douglas Fox

Riportando alla luce esperimenti di mezzo secolo fa, alcuni fisici sostengono che i neuroni comunicano con impulsi meccanici anziché elettrici. Se la loro tesi fosse confermata, sarebbe una rivoluzione nel nostro modo di intendere la trasmissione dei segnali nervosi, e quindi il funzionamento del cervello.

La fine dell'Artico

di Jennifer A. Francis

Negli ultimi tre anni il cambiamento del clima artico ha segnato nuovi record. La banchisa sta sparendo, la temperatura dell'aria aumenta, il permafrost è in disgelo e i ghiacciai si sciolgono. Questo rapido riscaldamento sta modificando la corrente a getto e il vortice polare, prolungando così le ondate di caldo e di freddo, la siccità e le piogge torrenziali in tutto il mondo.



Cortesia CSIRO/Shaun Amy (*telescopio*); Getty Images (*ghiacci*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - aprile 2018

Copyright © 2018 by Le Scienze S.p.A.
ISSN 2499-0590

Tutti i diritti sono riservati.
Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Paolo Cocco: *Il morso più forte*; Elisa Dalgo: *Gli strumenti della procreazione*; Eva Filoramo*: Un'occhiata all'interno;* Daniele Gewurz: *L'isola dei pesi massimi, Ombre di altri mondi.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Ufficio abbonamenti e Servizio Grandi clienti
Tel. 0864.256266
Fax 02 26681991

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8467 del 21/12/2017

LEGGERE, APPROFONDIRE, COLLEZIONARE.

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

ABBONATI SUBITO

CON QUESTA PROPOSTA SUPERVANTAGGIOSA.

PIÙ AUMENTA LA DURATA, PIÙ RISPARMI!

DURATA	PREZZO INTERO	PREZZO PER TE
1 ANNO 12 numeri	~~€58,80~~	€39,00
2 ANNI 24 numeri	~~€117,60~~	€75,00
3 ANNI 36 numeri	~~€176,40~~	€99,00

Solo con l'abbonamento puoi consultare su
www.lescienze.it il ricchissimo archivio dal 1968 ad oggi.

APPROFITTA DI QUESTA OFFERTA SPECIALE!

- Collegati al sito www.ilmioabbonamento.it
- Se preferisci telefona al numero 0864.25.62.66

"Questa è la conversazione più importante del nostro tempo e il libro di Tegmark vi aiuterà a prendervi parte."

STEPHEN HAWKING

Un capolavoro di concisione e chiarezza dall'astrofisico americano più amato e celebrato

Raffaello Cortina Editore